

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

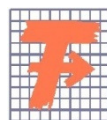
**LIBEREC 2011**

**JITKA LEČBYCHOVÁ**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**

Studijní program: B3107 Textil



Studijní obor: 3107R007 Textilní marketing

**ANALÝZA STANDARDNÍ METODY PRO  
HODNOCENÍ HYDROSTATICKÉ ODOLNOSTI  
TEXTILIÍ**

**ANALYSIS OF STANDARD METHOD FOR  
HYDROSTATIC RESISTANCE EVALUATION**

Jitka Lečbychová

KHT-753

**Vedoucí bakalářské práce:** Prof. Ing. Luboš Hes, DrSc.

**Konzultant bakalářské práce:** Ing. Roman Knížek

**Rozsah práce:**

Počet stran textu .....43

Počet obrázků ..... 14

Počet tabulek .....9

Počet grafů .....8

Počet stran příloh.....8

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jitka LEČBYCHOVÁ**  
Osobní číslo: **T08000396**  
Studijní program: **B3107 Textil**  
Studijní obor: **Textilní marketing**  
Název tématu: **Analýza standardní metody pro hodnocení hydrostatické odolnosti textilií**  
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište konstrukci vrchních oděvů pro sport a volný čas a uveďte požadavky na parametry komfortu nošení u těchto oděvů.
2. Přehledně vysvětlete základy termofyziologického komfortu textilií a způsoby jeho hodnocení včetně příslušných parametrů a vztahů, zejména pak metody zjišťování hydrostatické odolnosti oděvů pro vrchní ošacení.
3. Pomocí přístroje FX 3300 stanovte hydrostatickou odolnost nejméně 6 vzorků polopropustných textilií zahrnujících jak textilie laminované (s porézní i neporézní membránou), tak i tkaninu z mikrovláken. Měření proveďte při nejrychlejším, průměrném (resp. standardním dle [2] ) a nejpomalejším nárůstu měřicího tlaku.
4. Naměřené výsledky zpracujte statisticky a znázorněte graficky.
5. Výsledky analyzujte a stanovte takové podmínky měření, které s omezenou, předem známou přesností umožní nahradit hodnoty kritického hydrostatického tlaku získané při standardní době měření hodnotami tlaků platícími pro nejkratší dobu měření, tj. při nejrychlejším nárůstu měřicího tlaku.
6. Pro přepočet kritických hydrostatických tlaků získaných při krátké době měření na kritické tlaky získané při standardním nárůstu tlaků vytvořte tabulku přepočítávacích koeficientů, specifických pro jednotlivé materiály. V závěru diskutujte možnosti uplatnění zrychlené měřicí metody v praxi.

## PROHLÁŠENÍ

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 4.5.2011

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Velmi ráda bych poděkovala Prof. Ing. Luboši Hesovi, DrSc. především za cenné rady, ochotu a vstřícnost během celé doby odborného vedení mé práce. Zároveň patří velké poděkování konzultantu ing. Romanu Knízkovi, který mě vedl v odborném měření a vždy velkoryse zodpověděl mé otázky.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině za morální, ale i materiální podporu během celého studia.

## **ANOTACE**

Předmětem práce je zkoumání závislosti mezi normovanými a vyššími rychlostmi měření hydrostatické odolnosti textilií. Teoretická část je věnována komfortu nošení, na který úzce navazuje problematika polopropustných membrán. V experimentální části jsou představeny a diskutovány konkrétní hodnoty vodních sloupců jak z hlediska rychlostí měření, tak z hlediska zvolených materiálů. Na tomto základě jsou stanoveny koeficienty mezi středně rychlou normovanou a vyšší rychlostí. V závěru jsou zváženy možnosti využití výsledků ke konstrukci jednoduchého stroje pro rychlejší měření hydrostatické odolnosti.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

porézní membrána, neporézní membrána, zátěr, hydrostatická odolnost, vodní sloupec, reologie

## **ANNOTATION**

The bachelor thesis deals with hydrostatic resistance measurement and compares standardized and higher speeds of increasing water pressure. Theoretical part deals with clothing comfort connected with an issue of semipermeable membranes. In an experimental part are presented and discussed concrete values of water columns in terms of speed measurement and type of materials. Then are set coefficients between standardized middle fast and higher speed. In conclusion are considered an options of results for construction of a simple apparatus for faster hydrostatic resistance measurement.

### **KEY WORDS:**

porous membrane, non porous membrane, coating, hydrostatic resistance, water column, rheology

## **OBSAH**

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
<b>1. KOMFORT TEXTILÍ .....</b>	<b>12</b>
1.1. Základy termofyziologického komfortu .....	12
1.1.1 Tepelný odpor.....	13
1.1.2 Výparný odpor.....	13
<b>2. POLOPROPUSTNÉ TEXTILIE.....</b>	<b>15</b>
2.1 Polopropustná membrána.....	16
2.1.1 Mikroporézní membrána .....	16
2.1.1.1 Gore-Tex® Paclite®.....	17
2.1.2 Neporézní membrána.....	18
2.1.2.1 AlpinePro PTX.....	18
2.2 Povrstvená tkanina – zátěr .....	19
2.3 Základní vlastnosti polopropustných membrán .....	19
2.3.1 Propustnost pro vodní páry.....	19
2.3.2 Odolnost proti působení deště a tlaku vody .....	20
2.3.3 Odolnost proti větru .....	20
2.4 Výparný odpor versus vodní sloupec.....	20
<b>3. HYDROSTATICKÁ ODOLNOST TEXTILÍ.....</b>	<b>21</b>
3.1 Přístroje pro měření vodního sloupce .....	21
3.1.1 M018 HYDROSTATIC HEAD TESTER, SDL Atlas.....	21
3.2 Princip a průběh měření .....	22
3.3 Norma měření.....	22

<b>4. VOLBA NENORMOVANÉ RYCHLOSTI NÁRŮSTU HYDROSTATICKEHO TLAKU .....</b>	<b>24</b>
<b>5. REOLOGIE.....</b>	<b>25</b>
5.1 Reologie polymerů .....	26
5.1.1 Hookeův zákon .....	26
5.1.2 Newtonův zákon .....	27
5.1.3 Relaxace – Maxwellův model .....	28
5.1.4 Kríp – Kelvinův model .....	29
<b>6. HYPOTÉZA .....</b>	<b>31</b>
<b>7. VZTAHY MEZI RYCHLOSTMI MĚŘENÍ, STANOVENÍ KOEFICIENTŮ ..</b>	<b>34</b>
<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>35</b>
<b>8. STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI .....</b>	<b>35</b>
<b>9. VÝPARNÝ ODPOR .....</b>	<b>36</b>
9.1 Výparný odpor v závislosti na vodním sloupci .....	36
<b>10. HODNOCENÍ PROPUSTNOSTI TEXTILÍ PRO VZDUCH .....</b>	<b>37</b>
<b>11. MĚŘENÍ HYDROSTATICKE ODOLNOSTI TEXTILÍ.....</b>	<b>38</b>
11.1 Podmínky měření dle normy ISO 811:1981 .....	38
11.2 Rychlost nárůstu tlaku 60 cmH <sub>2</sub> O/min – norma, středně rychle.....	38
11.3 Rychlost nárůstu tlaku 10 cmH <sub>2</sub> O/min – norma, pomalé měření .....	39
11.4 Rychlost nárůstu tlaku 150 cmH <sub>2</sub> O/min .....	40
<b>12. ROZMĚROVÉ ZMĚNY MATERIÁLŮ .....</b>	<b>43</b>
12.1 Rozměrová změna – porovnání 60 cmH <sub>2</sub> O/min a 150 cmH <sub>2</sub> O/min .....	44
12.2 Rozměrová změna – porovnání 10 cmH <sub>2</sub> O/min a 60 cmH <sub>2</sub> O/min .....	45
<b>13. ZÁVISLOST RYCHLOSTI MĚŘENÍ NA MÍŘE VODNÍHO SLOUPCE DLE DRUHU TEXTILÍ.....</b>	<b>47</b>
13.1 Stanovení koeficientů .....	48



13.2 Dynamika nárůstu vodního sloupce .....	48
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>54</b>
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	55
SEZNAM TABULEK.....	55
SEZNAM GRAFŮ .....	56
SEZNAM PŘÍLOH .....	56

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

cca	přibližně
cmH <sub>2</sub> O	centimetr vodního sloupce
min	minuta
obr.	obrázek
pozn.	poznámka
Pa	pascal – jednotka tlaku
tab.	tabulka
tzv.	takzvaně
viz.	vidět

## ÚVOD

Životní úroveň populace z hlediska oblékání, cestování, sportu a zájmových aktivit s vývojem, nárůstem a vzděláním obyvatel roste. S touto skutečností souvisí potřeba lidí přizpůsobit oděv právě k jedné specifické činnosti. Okruh zájmů je velmi široký a pro každou činnost je snaha vyrobit odpovídající oděv. Lidé jsou totiž náročnější na tzv. komfort nošení.

Výrobci se snaží zdokonalovat své materiály, kombinovat je a přizpůsobovat specifickým potřebám zákazníků. Vše má ale své hranice, které jsou v této oblasti především chemické a fyzikální. V praxi se to projevuje tak, že pokud chce výrobce jednu vlastnost upřednostnit, stane se tak na úkor vlastnosti druhé. Uvedeme příklad přímo odpovídající tématu práce. Cílem textilií s vysokou hydrostatickou odolností je zároveň nízký výparný odpor. Tyto parametry jsou si přímo úměrné, proto se upřednostňuje pouze jedna z vlastností.

Na tuto skutečnost doplácí běžní spotřebitelé, kteří o optimálních hodnotách základních parametrů textilií nemají dostatečné informace. Stávají se tak oběťmi marketingových podvodů, ve kterých jsou například uváděna vysoká čísla vodního sloupce. Zákazník však již neví, že je ho dosaženo na úkor paropropustnosti. Závažnějším nedostatkem jsou neuvedené údaje o podmínkách měření, které výsledné hodnoty značně ovlivňují. Jedná se především o teplotu a vlhkost prostředí při měření.

Tato práce je zaměřena na problematiku měření hydrostatické odolnosti textilií, tedy velikosti tzv. vodního sloupce. Měření je ošetřeno normou ISO 811:1981 TEXTILIE. STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI VODĚ – ZKOUŠKA TLAKEM VODY. Cílem je zjistit, jak se chovají a jakých dosahují hydrostatických odolností textilie při rychlejším, než normovaném nárůstu tlaku. Měření normovanými rychlostmi trvá v rozmezí cca půl hodiny až dvě a půl hodiny, dle materiálu. Jelikož se dnes vyvíjí již vysoce hydrostaticky odolné textilie, samotné testování by zabralo mnoho času. Cílem je tedy zjistit, zda lze zkrátit dobu testování. Výhledovým záměrem (tento záměrem není předmětem práce) je tedy sestavit jednoduchý, lehký a skladný přístroj určený obchodníkům, který by dokázal spolehlivě změřit hodnotu vodního sloupce za kratší čas (tj. vyšší rychlostí nárůstu tlaku, než uvádí norma). Tento přístroj by sloužil

obchodníkům a jejich zákazníkům, kteří si chtějí sami ověřit skutečné parametry textilního materiálu.

## TEORETICKÁ ČÁST

### 1. KOMFORT TEXTILIÍ

„Komfort je stav organismu, kdy jsou fyziologické funkce organismu v optimu, a kdy okolí včetně oděvu nevytváří žádné nepříjemné vjemy vnímané našimi smysly“ [1].

Všechny funkce lidského těla jsou v optimu, nepocítíme chlad, nadměrné teplo, tlak ani bolest a povrch kůže je suchý. „Komfort je vnímán všemi lidskými smysly kromě chuti, v následujícím pořadí: hmat, zrak, sluch, čich“ [1].

Komplexní vjem komfortu textilií lze rozdělit na několik částí, je to: psychologický, senzorický, patofyziologický a termofyziologický komfort. V této práci se zaměříme právě na komfort termofyziologický.

#### 1.1. Základy termofyziologického komfortu

Termofyziologický komfort závisí na termoregulačním systému organismu a na vhodné konstrukci oděvů. „Je tedy nutné konstruovat oděvy tak, aby jejich schopnost přenosu tepla, kapalně i plynné vlhkosti a někdy i vzduchu zajišťovaly při nošení optimální hodnoty“ [1].

„Komfortní stav“ organismu nastává při teplotě lidské pokožky 33-35°C a při nepřítomnosti vody na pokožce. Dalším faktorem ovlivňujícím termofyziologický komfort jsou vnější vlivy, kde se optimální hodnoty pohybují u relativní vlhkosti vzduchu v rozmezí 50±10 %, u rychlosti proudění vzduchu 25±10 m/s a u obsahu oxidu uhličitého v ovzduší na úrovni 0,07 % [1].

Pokud dojde k vychýlení těchto hodnot, nastává v těle proces termoregulace (reálně probíhá neustále). „Organismus člověka představuje samoregulační systém, jehož fyziologický mechanismus je zaměřen na udržení stálosti vnitřního prostředí na principu rovnováhy mezi množstvím tepla vytvořeného organismem a množstvím tepla odevzdaného do okolního prostředí“ [1].

Při konstrukci oděvů je důležité, aby proces termoregulace (a s ním spojené jevy transport tepla a vlhkosti) oděvy podporovaly. Určujícími parametry jsou tepelný a výparný odpor materiálu.

### 1.1.1 Tepelný odpor

Tepelný odpor je přímo úměrný tloušťce materiálu  $h$  a nepřímo úměrný tepelné vodivosti  $\lambda$ . Vztah mezi těmito parametry je následující:

$$R = \frac{h}{\lambda} \quad [m^2 K \cdot W^{-1}] \quad (1)$$

Tepelný odpor je přímo úměrný tloušťce materiálu a nepřímo úměrný tepelné vodivosti. Materiál s nízkou tepelnou vodivostí bude mít tedy vyšší tepelný odpor, tzn. bude transportovat méně tepla. Celkový tepelný odpor soustavy se skládá z tepelného odporu oděvu a tepelného odporu mezní vrstvy. Měří se např. přístrojem ALAMBETA.

„Klidný vzduch při teplotě 20°C má tepelnou vodivost 0,026 W/m.K, zatímco tepelná vodivost vody je 0,6 W/m.K, tj. asi 25x vyšší. Proto je přítomnost vody v textiliích nežádoucí“ [1].

Textilie a oděvní vrstvy by měly být sestaveny tak, aby odváděly vlhkost od těla. Tímto navazujeme na další důležitý parametr, kterým je výparný odpor.

### 1.1.2 Výparný odpor

„Propustnost textilií pro vodní páry obecně se nejčastěji hodnotí pomocí výparného odporu  $R_{et} [Pa \cdot m^2 / W]$ “ [1].

Proces prostupu vodních par je velmi důležitý pro ochlazování těla, které se děje právě odpařováním vyprodukovaného potu. Mimo jiné závisí toto ochlazování také na rozdílu parciálních tlaků vodních par na povrchu pokožky a ve vnějším prostředí. Celkový výparný odpor se skládá z výparného odporu oděvu a výparného odporu mezní vrstvy [1].

„Čím je nižší hodnota  $R_{et}$ , tím je propustnost textilie pro vodní páry vyšší. Dříve užívaná jednotka  $g/m^2 \cdot 24hod$  se pak označuje jako propustnost vodních par a je měřena podle ASTM E96-BWa ISO 2528. Nevýhodou této jednotky je okolnost, že z ní není ihned patrné, při jaké vlhkosti vnějšího vzduchu k příslušné propustnosti dochází“ [1].

Dalším souvisejícím pojmem je relativní paropropustnost, která je nepřímo úměrná výparnému odporu a udává se v procentech. Výše uvedené hodnoty naměříme např. přístrojem PERMETEST.

„Klasifikace propustnosti textilií pro vodní páry v obou jednotkách je dle stávajících norem ISO následující:

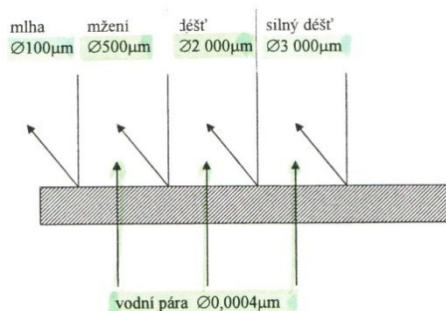
$R_{et}$	$< 6$	- velmi dobrá	(nad 20 000 g/m <sup>2</sup> .24hod)
$R_{et}$	6 - 13	- dobrá	(9000 – 20 000 g/m <sup>2</sup> .24hod)
$R_{et}$	13 - 20	- uspokojivá	(5000 – 9000 g/m <sup>2</sup> .24hod)
$R_{et}$	$> 20$	- neuspokojivá	(pod 5000 g/m <sup>2</sup> .24hod)“

[1]

## 2. POLOPROPUSTNÉ TEXTILIE

S potřebou zdokonalovat textilie a dosahovat vyššího komfortu nošení je cílem produkovat takové materiály, které budou vysoce odolné vnějším vlivům a zároveň schopné podpory lidské termoregulace. „Jedná se o textilie, které mají schopnost propouštět vlhkost produkovanou organismem ve formě vodní páry – směrem od těla a současně zabraňují průchodu vlhkosti z okolního prostředí směrem k pokožce“ [1]. Tyto textilie se označují jako polopropustné. „Také odolávají působení větru a tím snižují tepelné ztráty konvekcí“ [1].

Základní princip polopropustných textilií je ten, že jsou schopny filtrovat částice určité velikosti v jednom směru, přitom ve směru druhém prochází částice v poměru menší neomezeně. Cílem je tedy zamezení prostupu vlhkosti v jednom směru a to přes textilií k tělu, současně se zachováním prostupu vodních par směrem od těla. Využívá se při tom průměru vodních kapek v různých podmínkách. Zatímco od těla proniká textilií pouze vodní pára, jejíž jedna částice má průměr 0,0004  $\mu\text{m}$ , v opačném směru působí vlhkost v podobě mlhy nebo deště s větším průměrem částic. Princip a jednotlivé rozměry částic vody různé podoby jsou zřejmé z následujícího obrázku.



Obrázek 1- Velikost vodních kapek za různých podmínek [1]

Textilie s touto schopností primárně rozdělujeme na:

1. tkaniny s hustou dostavou
2. tkaniny povrstvené mikroporézní vrstvou, koagulační technikou nebo hydrofilní vrstvou
3. tkaniny laminované užitím membrán [1]



V této práci se zabýváme měřením polopropustné mikroporézní i neporézní membrány a zátěru, kde zátěr je tkanina povrstvená neporézní vrstvou. Konkrétní použité materiály i s jejich obecnou charakteristikou jsou popsány v následujících kapitolách.

## **2.1 Polopropustná membrána**

„Je to membrána, která se vyrábí jako samostatná fólie a následně se laminuje na základní materiál“ [1]. Pracuje na principu různého průměru kapek vody za odlišných podmínek. Existují následující dva druhy membrán: mikroporézní a neporézní, které dále členíme dle vrstev laminátů.

Předem je třeba poznamenat, že dostupné informace jsou určeny spotřebiteli, proto jsou uvedeny tak, aby kladně ovlivnili jeho mínění. Odborníkovi slouží spíše pro určení charakteru materiálu. K bližším a důvěryhodným závěrům je třeba znát konkrétní hodnoty vlastností i s podmínkami jejich měření.

### **2.1.1 Mikroporézní membrána**

Tato membrána je tvořena jako fólie s mikroskopickými póry. Průměr pórů je od 0,1 do 3  $\mu\text{m}$ . Vlhkost se transportuje difúzí prostřednictvím těchto pórů a to ve směru nižšího parciálního tlaku vodní páry k vyššímu. Mikroporézní membrány jsou označovány také jako hydrofobní, protože vodní částice se navážou na strukturu membrány, jen jí prochází, resp. difundují na povrch [1].

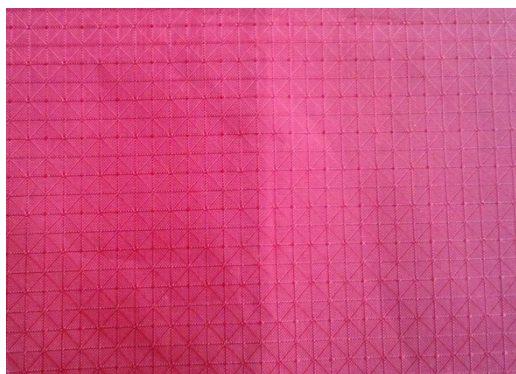
Známým výrobcem mikroporézních membrán je společnost GORE INC., podle které se jejich membrána nazývá. Fólie je vyrobena z polyethylentereftalátu (zkratka PTFE) a laminuje se na polyamidové nebo polyesterové tkaniny. Dle zdroje [2] se vyznačuje „výjimečnou nepromokavostí, naprostou odolností proti větru a vysokou paropropustností“. Tato membrána má několik dalších variant, které jsou zaměřeny na speciální potřeby. Gore-Tex® Pro Shell (dostupný ve dvou i třívrstevném provedení) se vyznačuje vysokou odolností vůči oděru a roztržení, Gore-Tex® XCR® je inovovaným

materiálem se zvýšenou prodyšností a Gore-Tex® Paclite® je popsán v samostatném odstavci [2].

#### 2.1.1.1 Gore-Tex® Paclite®

V této práci testujeme právě materiál Gore-Tex® Paclite®, který je dle zdroje [2] charakterizován následovně. „Nejprodyšnější odlehčený laminát s membránou Gore, která je z vnitřní strany opatřena speciální ochrannou vrstvou s karbonovými vlákny, nahrazujícími podšívku a zpevňuje celý materiál. Díky tomu se zjednoduší konstrukce oblečení a výsledkem je oblečení s minimální hmotností a velmi dobrou skladností. Prodyšnost  $R_{et} < 4,0$  (zde je také patrné, jak autor chybně označuje paropropustnost, kterou nazývá prodyšností). Vhodný pro turistiku, cyklistiku, běh a jiné aerobní sporty, kde potřebujete ušetřit hmotnost a prostor“ [2].

Hlavními uživatelskými vlastnostmi Gore-Tex® Paclite® je tedy velice vysoká paropropustnost, lehkost, skladnost. Plošná hmotnost činí  $85 \text{ g.m}^{-2}$ . Tento materiál není přímo určen do náročných podmínek, proto bychom jako uživatelé požadovali přiměřenou hydrostatickou odolnost cca 10 – 15  $\text{mH}^2\text{O}$ . Vzhledem k sportovnímu a turistickému určení bychom měli klást důraz na paropropustnost resp. výparný odpor, který by měl být pro správný odvod vodních par od těla co nejnižší. 100 % větruvzdornost je již přirozeným předpokladem. O skutečných hodnotách se přesvědčíme v praktické části.



Obrázek 2 – Gore-Tex® Paclite®, líc



Obrázek 3 - Gore-Tex® Paclite®, rub

### 2.1.2 Neporézní membrána

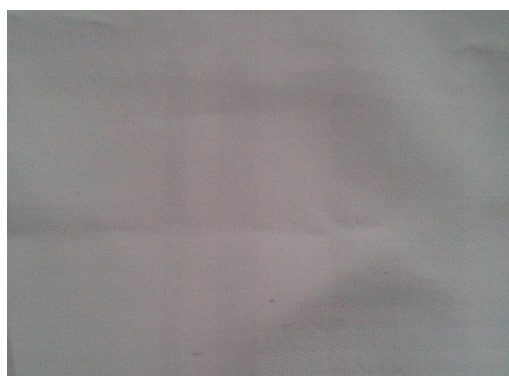
„Materiál je na povrchu hladký a nevstřebává tuk (nedochází k ucpání pórů) a chová se jako textilie, nikoliv jako fólie“ [2]. Průměr póru je menší, než  $0,001\ \mu\text{m}$ . Tato tedy „neporézní“ membrána se označuje jako hydrofilní, protože vlhkost není vedena výhradně póry, ale šíří se celou strukturou materiálu sorpcí. Vlhkost prostoupí materiálem až na povrch, kde se odpařuje [2]. Jejich společnou charakteristikou je také cíl vysoké odolnosti proti vnějším vlivům (100% větruvzdornost, hydrostatická odolnost) a cíl vysoké paropropustnosti. Obdobným charakteristickým zástupcem je SympaTex® membrane. Mezi další patří Climactive®, Climatic® Extreme, DRYtech™ nebo Windstopper® membrane. V této práci je měřen neporézní membránový materiál PTX používaný společností AlpinePro.

#### 2.1.2.1 AlpinePro PTX

Tento materiál se skládá z polyuretanové neporézní membrány laminované na polyamidové tkanině. Z dostupného zdroje jsou známé hodnoty paropropustnosti:  $5\ 000 - 10\ 000\ \text{g/m}^2 \cdot 24\text{hod}$  (což odpovídá uspokojivému  $R_{\text{et}}$  13-20) a 5 – 10 m vodního sloupce[3]. Plošná hmotnost textilie je  $156\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Z uvedených informací lze usoudit, že ve srovnání s Gore membránou je charakter materiálu podobný, hodnoty vlastností odpovídají nižší cenové kategorii. Uvedené hodnoty budou ověřeny měřením v praktické části.



Obrázek 4 - AlpinePro PTX, líc



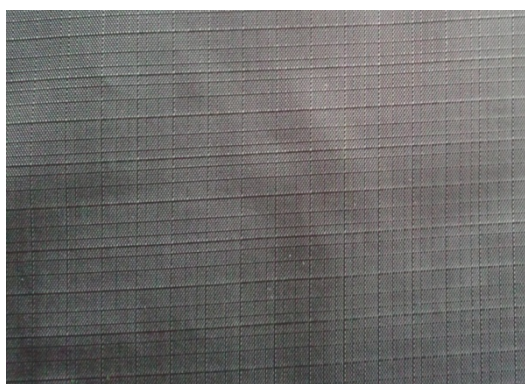
Obrázek 5 - AlpinePro PTX, rub

## 2.2 Povrstvená tkanina – zátěr

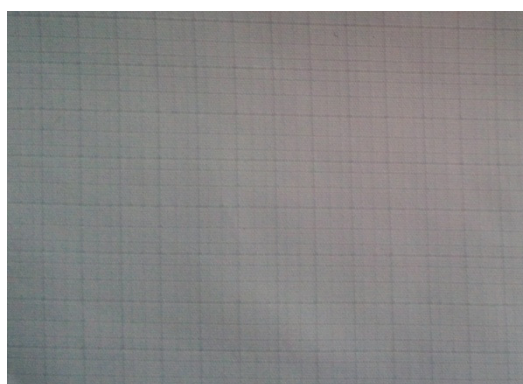
Zátěr, jak už název napovídá, není fólie, ale hmota aplikovaná roztíráním na podkladovou textilii v tenké vrstvě. Tato vrstva pracuje při odvodu vodních par od těla na stejném principu, jako neporézní membrána. Většinou je tvořena z polyuretanu.

Rozdíl oproti membránám je vyšší elasticita materiálu, rychlejší odvod vlhkosti, avšak nižší mechanická odolnost [1]. Dosahují tedy nižších hodnot vodního sloupce.

Jako příklad zátěrových materiálu uvedeme Climaway®, Conduit™ Silk nebo Triplepoint® charakteristický několikavrstvým zátěrem [2]. V této práci je měřen zátěr AlpinePro Aquacore. (Jeho plošná hmotnost činí  $130 \text{ g.m}^{-2}$ .)



Obrázek 6 - AlpinePro Aquacore, líc



Obrázek 7 - AlpinePro Aquacore, rub

## 2.3 Základní vlastnosti polopropustných membrán

### 2.3.1 Propustnost pro vodní páry

Pot se na povrchu těla shromažďuje, a buď je odveden textilií na povrch, nebo se samovolně vypařuje. Samotná textilie může toto odpařování podpořit nebo jej výrazně tlumit. Schopnost textilie propustit vodní páry se tedy měří a to na tzv. skin modelech, které simulují pocení lidského těla. Jedním z nich je např. PERMETEST. „Základem přístroje je vyhřívaná a zvlhčovaná porézní deska označovaná jako „model kůže“ sloužící k simulaci procesů přenosu tepla a hmoty, ke kterým dochází mezi lidskou pokožkou a okolím“ [1].

Porézní povrch je zvenku ofukován a zevnitř zvlhčován, je zajištěno, aby měření probíhalo při konstantní teplotě. Dochází k výparnému toku, který je měřen snímačem. „Nejdříve se měří tepelný tok bez vzorku a poté znovu se vzorkem a přístroj registruje odpovídající tepelné toky  $q_0$  a  $q_v$ “ [1].

### 2.3.2 Odolnost proti působení deště a tlaku vody

Jiným názvem odolnost proti hydrostatickému tlaku vody vyjadřujeme mírou tzv. vodního sloupce. Vodní sloupec udává množství vody vyjádřené v *mm, cm nebo m*, které působí na textilií plochou  $100 \text{ cm}^2$ . Vlastnost je předmětem zkoumání této práce a podrobněji bude charakterizovaná v následujících odstavcích.

### 2.3.3 Odolnost proti větru

U membrán je žádoucí, aby jejich propustnost pro vzduch neboli prodyšnost byla nulová. Tuto hodnotu vyjadřujeme v  $\text{m.s}^{-1}$  a lze ji snadno změřit např. na přístroji FX 3300. „Jeho princip spočívá ve vytvoření tlakového rozdílu mezi oběma povrchy testované textilie (nejčastěji 100 Pa) a měření takto vyvolaného průtoku vzduchu“ [1]. Předpokládáme, že naměřené hodnoty testovaných textilií budou nulové.

## 2.4 Výparný odpor versus vodní sloupec

Cílem je dosáhnout vysoké hydrostatické odolnosti současně s nízkým výparným odporem. Často se však s rostoucí hodnotou vodního sloupce zvyšuje i hodnota výparného odporu. Pokud tedy potřebujeme dosáhnout vysoké hydrostatické odolnosti, bude to na úkor výparného odporu a naopak.

Pokud tedy dosahuje materiál vysokých hodnot vodního sloupce, měly bychom věnovat pozornost míře výparného odporu, která bude zřejmě zvýšená. V opačném případě nízké hladiny výparného odporu, očekáváme i nižší hydrostatickou odolnost.

### 3. HYDROSTATICKÁ ODOLNOST TEXTILÍ

Hydrostatickou odolnost textilií vyjadřujeme výškou vodního sloupce, který je charakterizován tlakem vody působícím na textilií zvnějšku. Pro představu můžeme podle Pascalova vztahu odvodit následující:

$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (2)$$

Kolika pascalům odpovídá 1 mH<sub>2</sub>O? Jednoduše dosadíme:

$$p = 1 \cdot 1000 \cdot 9,807 = 9807 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3)$$

Výška 1 mH<sub>2</sub>O se přibližně rovná tlaku 9807 Pa, kde konstantou pro přepočet hodnot je přibližně 0,000102.

#### 3.1 Přístroje pro měření vodního sloupce

Na trhu je k dostání široká škála přístrojů, které však mají různé nedostatky. Kromě řady produktů z Číny (např. od společnosti *KEJIAN* stroj *KJ-3093 Hydrostatic Head Tester* – zdroj *KEJIAN*), se na trhu pohybují evropské přístroje splňující normu ISO 811. Např. švýcarská společnost *TEXTTEST AG* disponuje se strojem *Automatic Hydrostatic Head Tester FX 3000 HYDROTESTER III*, který automaticky detekuje kapky [4]. Měření v rámci této práce byla prováděna na následujícím přístroji.

##### 3.1.1 M018 HYDROSTATIC HEAD TESTER, SDL Atlas

Tento přístroj, kterým disponuje Katedra Hodnocení textilií TUL (k vidění na obr. 1), vyrobila společnost *SDL Atlas*.

Původem britská společnost navázala již v počátku vztahy s americkým textilním průmyslem a dále směřovala na východ do Číny. Nyní má tedy sídlo ve Velké Británii, USA a dvakrát v Číně. Společnost se zabývá výrobou a distribucí široké škály testovacích přístrojů pro měření specifických vlastností textilních materiálů [5].

Testovací hlavice má rozměry 100 cm<sup>2</sup>, rychlost nárůstu tlaku je možno nastavit v rozmezí od 1cmH<sub>2</sub>O/min do 100 cmH<sub>2</sub>O s krokem 1cmH<sub>2</sub>O/min a od 100 cmH<sub>2</sub>O do 500 cmH<sub>2</sub>O s krokem 50 cmH<sub>2</sub>O. Detekce kapek se provádí zrakem. Přístroj ukazuje



míru vodního sloupce v jednotkách  $\text{cm H}_2\text{O}/\text{min}$ , který se spolu s rychlostí a časem měření zobrazuje na displeji.



Obrázek 8 - Ukázka přístroje M018 Hydrostatic Head Tester

### 3.2 Princip a průběh měření

Textilii se umístíme na kruhovou oblast tak, aby po přitlačení a upevnění hlavicí přesahovaly kraje. Plocha testované textilie je  $100 \text{ cm}^2$ . Po nastavení rychlosti nárůstu vodního sloupce je spuštěno měření. Destilovaná voda je vytlačována stlačeným vzduchem a působí tlakem na plochu textilie. Tento tlak je automaticky regulovaný dle nastavené rychlosti jeho nárůstu. Vlivem tlaku je textilie „nafukována“ a tvoří se kulový vrchlík, který se změnou tlaku mění rozměry – roste. Měření probíhá dle normy ISO 811 do doby, než se na povrchu textilie objeví tři kapky. V tomto okamžiku je měření zastaveno, zaznamenán čas a dosažená výška vodního sloupce.

### 3.3 Norma měření

Měření hydrostatické odolnosti v této práci podléhají normě ČSN EN 20811, ISO 811:1981. Přesný název normy zní: „Textilie. Stanovení odolnosti proti pronikání vody.

Zkouška tlakem vody.“ V angličtině také: „Textile fabrics – Determination of resistance to water penetration – Hydrostatic pressure test“. Norma byla vydána Českým normalizačním institutem r. 1994 [6].

V rámci tohoto odstavce zmíníme nejdůležitější body normy. Velikost upínaného vzorku musí být  $100 \text{ cm}^2$ . „Tlak vody může na vzorek působit zespodu nebo shora. Použitý směr působení tlaku by měl být uveden v protokolu o zkoušce. Rychlost zvyšování tlaku vody musí být  $(10 \pm 0,5)$  nebo  $(60 \pm 3)$  cm vodního sloupce. Destilovaná nebo zcela neionizovaná voda by měla mít teplotu  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  nebo  $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Tlak, při kterém pronikne voda plošnou textilií ve třetím místě, se zaznamenává. Výsledek zkoušky přímo vyjadřuje odolnost výrobků z plošných textilií proti krátkodobému nebo střednědobému působení tlaku vody [6].



#### **4. VOLBA NENORMOVANÉ RYCHLOSTI NÁRŮSTU HYDROSTATICKEHO TLAKU**

Délka měření se liší dle měřených textilií. U textilií, které jsou charakteristické vysokou nebo dobrou hydrostatickou odolností (membrány, zátěr) trvá měření v rozmezí půl hodiny až dvou hodin. Cílem práce je získat vypovídající hodnoty z měření, které by trvalo řádově několik minut. Jelikož norma udává rychlosti 10 a 60 cmH<sub>2</sub>O/min, rádi bychom zvolili pro „rychlé měření“ dvojnásobek. Přístroj však nabízí pouze variantu 100 nebo 150 cmH<sub>2</sub>O/min, proto volíme spíše vyšší rychlost a to 150 cmH<sub>2</sub>O/min.

Bez ohledu na reálné vlastnosti polopropustné textilie vyvstávají následující možnosti. Naměřené hodnoty vodního sloupce nebudou od ostatních rychlostí výrazně odlišné. Nebo naopak naměřené hodnoty odlišné budou a důležité bude o kolik. Hodnoty vodního sloupce a tedy i změna s nárůstem rychlosti se budou lišit dle textilie.

Složení a struktura polopropustné textilie zde hrají významnou roli. Při působení tlaku vody jsou namáhány jak samotné membrány a zátěr, tak i jejich podkladové textilie. Vlivem tlaku je přetvářena struktura obou složek a tím se mění jejich výchozí vlastnosti. Podrobnější náhled do problematiky změn vlastností při deformaci poskytuje v následující kapitole reologie polymerů.

## 5. REOLOGIE

Reologie je název vymezený pro mechanicko – fyzikální vědní oblast zaměřenou na studium deformace materiálů. Pojem reologie byl zaveden r.1926 americkým fyzikem E.C. Binghamem [7].

„Podle mechanických vlastností materiálů kvalitativně rozlišujeme tři základní skupenství: plynné, kapalné a pevné. Nevazký ideální plyn, nestlačitelná vazká (newtonská) kapalina a izotropní pružné (hookovské) těleso představují nejjednodušší matematické popisy jejich mechanických vlastností, tzv. konstitutivní modely“ [8].

„Každý ze tří zmíněných konstitutivních modelů byl ve své době pokládán za dostatečně univerzální základ popisu relevantní třídy jevů. Každý z nich během času postoupil své místo komplikovanějším konstitutivním představám, studovaného dnes v rámci interdisciplinárního oboru na pomezí mechaniky a fyzikální chemie, zvaného reologie“ [7].

„Reologie zkoumá, jak se mění a přetvářejí pevné látky a tečou i proudí kapaliny a plyny za působení mechanických vlivů“ [7]. Neboli reologie popisuje různé mechanické vlastnosti materiálů za různých deformačních podmínek.

Těchto znalostí se později využívá k předpovědi chování materiálů za jiných, změněných podmínek. Pomocí reologie je také možné jednotně posoudit mechanické jevy probíhající ve všech třech skupenstvích.

Znalosti tohoto oboru se uplatňují například v oblastech zpracování kovu, keramiky, skla, oblast výroby olejů, barviv nebo past. Další oblastí je výroba plastických hmot, celulózových a kaučukových výrobků. V neposlední řadě se reologie využívá při studiu horotvorných procesů a nově při zkoumání reologických vlastností krve [7].

„Zásadní impulz pro rychlý rozvoj reologie v druhé polovině dvacátého století přišel s hromadným použitím pevných i kapalných polymerních systémů“ [8].

## 5.1 Reologie polymerů

Jak už bylo řečeno, reologie se zabývá změnami látek za působení mechanických vlivů. „Při aplikaci jakéhokoliv polymerního materiálu v konstrukční praxi jsou důležité jeho deformační vlastnosti, které vyjadřují vztah mezi vnější silou a deformací materiálu“ [9].

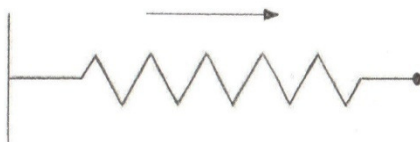
Polymer se pod vlivem mechanického namáhání chová současně jak pružný materiál, tak i nestlačitelná kapalina. „Limitním případem vazké nestlačitelné kapaliny je kapalina ideální (s nulovou viskozitou). Limitním případem pružného materiálu (tělesa) je těleso tuhé (s nekonečně velkým modulem pružnosti)“ [8]. Pružné (elastické) a tokové (viskózní) chování se nazývá viskoelastická.

### 5.1.1 Hookeův zákon

Pro dokonale pružné těleso existují pravidla popsané Hookeovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \gamma \quad (4)$$

Zde figuruje napětí  $\sigma$ , modul pružnosti  $E$  a deformace  $\gamma$ . Pro představu jej znázorníme pomocí modelu dokonale elastické pružiny (viz. obrázek 3).



Obrázek 9 - Model dokonale elastické pružiny

„V okamžiku náhlého působení napětí se ihned dostaví deformace“ [10]. Jelikož pružnost neboli elasticita je schopnost látek deformovat se vratně, těleso se v okamžiku zastavení působení napětí vrací skokem do původního stavu. Mechanické vlastnosti elastické složky tedy nejsou závislé na čase.

„K popisu deformačního chování stačí jediná materiálová konstanta, modul pružnosti, který nezávisí ani na velikosti deformace ani na době jejího trvání. Modul

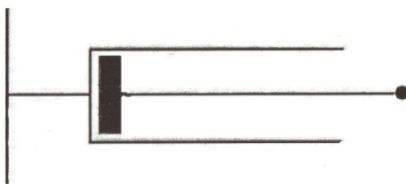
pružnosti závisí na teplotě“ [9]. Uvažujeme a u měření udržujeme konstantní teplotu a tím i konstantní modul pružnosti.

### 5.1.2 Newtonův zákon

Toková složka polymeru je popsána Newtonovým zákonem. „Viskozita je definována jako konstanta úměrnosti mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí.“ „Při působení konstantního smykového napětí kapaliny tečou a jejich smyková deformace s časem lineárně roste“ [11]. Deformace viskózní složky je tedy lineárně závislá na čase a platí vztah:

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad [9] \quad (5)$$

Zde  $\tau$  představuje smykové napětí,  $\eta$  viskozitu a  $d\gamma/dt$  rychlost smykové deformace. Ideální tokové vlastnosti představuje model pístu na obrázku 4.



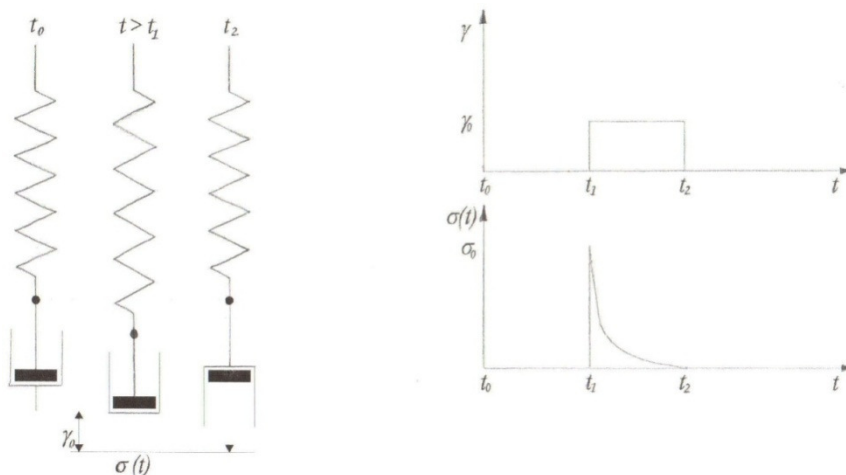
Obrázek 10 - Model pístu s ideálními tokovými vlastnostmi

Tento model se znázorňuje jako válec s netěsným pístem a kapalinou o viskozitě  $\eta$ , ve které se píst pohybuje [9]. V okamžiku zastavení působení napětí zůstává deformovaný stav zachován a nevrací se do stavu původního, jako u elastické složky.

„Hookeovská elasticita a newtonovská viskozita jsou dva mezní případy reologického chování“ [11]. Reálné polymerní systémy jsou velmi komplikované, proto se jejich reakce na mechanické namáhání demonstruje na zjednodušených modelech. Protože polymery jsou viskoelastické, skládají se tyto modely jak z elastické složky – pružiny, tak z viskózní složky – pístu dohromady. Uvažujeme-li dva základní zjednodušené modely obsahující oba prvky, nastávají při mechanickém namáhání dvě reakce – relaxace a kríp (creep) neboli tečení.

### 5.1.3 Relaxace – Maxwellův model

Relaxační pokus schematicky znázorňuje Maxwellův model, který obsahuje jednotlivé názorné prvky viskoelastických složek sériově spojené za sebou (na obr 5 v čase  $t_0$ ).



Obrázek 11 - Maxwellův model: sériové zapojení prvků, působení konstantní deformace

Graf 1 – Schéma znázorňující působení deformace a napětí v závislosti na čase (konstantní deformace)

[12]

Viskoelastický materiál je okamžitě, s vysokou stříhovou rychlostí deformován ( $t_1$ ) a tato deformace je udržována v čase  $t_1$  až  $t_2$ . Pokus spočívá v pozorování změny napětí pružiny při její konstantní deformaci. Pružná část při zdeformování reaguje okamžitě, napětí je maximální, ale toková složka kvůli dané viskozitě zareaguje pomaleji. Pohyb pístu a jeho vzrůstající napětí snižuje napětí v pružině. „Napětí nutné k udržení deformace se postupně snižuje, dochází k jeho relaxaci.“ [9] Elastická složka zrelaxovala do původního stavu, ale viskózní zůstává trvale zdeformovaná ( $t_2$ ).

Platí:

v čase  $t_0$  je  $\sigma = 0$  ... napětí před deformací

v čase  $t_1$  je  $\sigma = \sigma_0$  ... napětí nutné k dosažení celkové deformace  $\gamma_0$

v čase  $t_1$  až  $t_2$  je  $\sigma = \sigma(t)$  ... napětí v deformovaném tělese [12]

„Celková deformace je rovna součtu deformací prvků, kdežto napětí je v obou prvcích a celém modelu stejné“ [11].

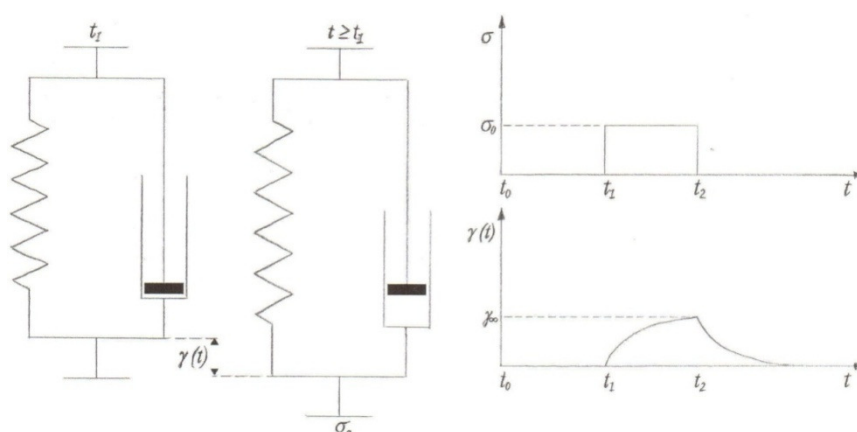
$$\gamma = \gamma_s + \gamma_d \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_s = \sigma_d \quad (7)$$

Dále z následujících výpočtů dle zdroje [9] vyplývá: „Napětí v deformovaném tělese tedy s časem relaxuje podle exponenciální závislosti“ [9].

#### 5.1.4 Kríp – Kelvinův model

Situace, kdy v polymerním materiálu nastává kríp neboli tečení se zjednodušeně znázorňuje Kelvinovým modelem, který obsahuje jednotlivé prvky viskoelastického materiálu spojené paralelně.



Obrázek 12 - Kelvinův model: paralelní zapojení prvků při konstantním napětí

Graf 2 – Schéma působení napětí a deformace v závislosti na čase (konstantní napětí) [12]

Nyní je pozorována změna deformace v čase za působení konstantního napětí. V okamžiku zapůsobení napětí tedy v čase  $t_1$  elastická složka nezareaguje ihned – je zde závislá na čase, protože je už při této akci bržděna viskózní složkou. Deformace se dostavuje později a sleduje se její průběh za působení stálého napětí (v čase  $t_1$  až  $t_2$ ). „Pro viskoelastické materiály je typický pozvolný nárůst deformace.“ „Krípem se tedy rozumí závislost deformace na čase při konstantním napětí“ [11].

Platí:

v čase  $t_0$  je  $\gamma = 0$  ...deformace před působením napětí

v čase  $t_1$  až  $t_2$  je  $\gamma = \gamma(t)$  ...vzniklá deformace po dobu působení napětí

v čase je  $t_2$  je  $\gamma = \gamma_\infty$  ...deformace se bude zmenšovat – nekonečně dlouho [12]

Celkové napětí modelu se v tomto případě skládá ze součtu jednotlivých napětí a deformace modelu i jednotlivých složek si je rovna.

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d \quad (8)$$

$$\gamma = \gamma_s = \gamma_d \quad [12] \quad (9)$$

V okamžiku zastavení působení napětí, tedy v čase  $t_2$ , dochází ke zpětnému krípu. „Deformovaná pružina má snahu se okamžitě vrátit do původního nedeformovaného stavu, ale opět je bržděna tokovým elementem. Velikost tohoto opoždění je přímo úměrná viskozitě  $\eta$ “ [11].

„Deformace Kelvinova modelu se po uvolnění napětí s časem zmenšuje podle exponenciální závislosti a po nekonečně dlouhé době vymizí úplně“ [9].

„K úvahám o Kelvinově a Maxwellově modelu je potřeba připomenout, že Maxwellův model přibližně vystihuje jev relaxace napětí reálných (nezesíťovaných) polymerů, ale vůbec se nehodí na popis krípkových vlastností.

Naopak Kelvinův element dobře popisuje krípkové vlastnosti, ale zas není vůbec schopný relaxace napětí. Polymery jsou charakteristické tím, že mají schopnost projevovat jak krípkové, tak relaxační vlastnosti současně.

Na popis mechanických vlastností polymerů závislých na čase musíme tedy nevyhnutelně použít oba dva dvouparametrové modely, o kterých mluvíme, že jsou mechanicky ekvivalentní“ [8].

Z modelů je také patrný fakt, že polymerní materiály reagují na mechanické namáhání se zpožděním.

## 6. HYPOTÉZA

Jak již bylo řečeno, v této práci je měřena hydrostatická odolnost polopropustných membrán a měření probíhá tak, že postupně narůstá vodní sloupec respektive hydrostatický tlak vody určitou rychlostí. Působíme tedy napětím a pozorujeme následnou deformaci. „Pro zjednodušení představy předpokládáme, že nárůst napětí probíhá v malých časových intervalech tak, že ho můžeme považovat za konstantní“ [13].

Membrány jsou polymerními materiály, na které se plně vztahují reologické zákonitosti. Už čas vypovídá své a v této práci se právě časem a s ním spojenou rychlostí zabýváme. Polymerní materiály reagují na mechanickou změnu se zpožděním a předpokládáme, že tato skutečnost se projeví na změně rychlosti nárůstu tlaku (neboli napětí).

Při rychlém nárůstu napětí v materiálu tedy deformace nastává se zpožděním a materiál je teoreticky schopen odolat vyššímu vodnímu sloupci.

Naopak při pomalém nárůstu napětí se deformace sice opět projeví se zpožděním, ale probíhá déle. Materiál je déle namáhán, více deformován a teoreticky odolá nižšímu vodnímu sloupci.

Domníváme se, že materiál složený z podkladové textilie a membrány se zjednodušeně chová jako následující paralelní model.



Obrázek 13 - Zjednodušené schéma modelu představujícího textilní materiál: membránu spojenou s podkladovou textilií

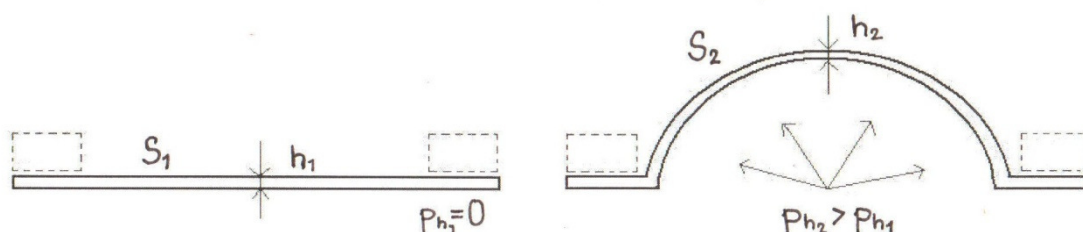


V tomto případě by se textilie při vyšších rychlostech nárůstu tlaku zdeformovala pouze vlivem elastické složky, protože viskózní složka by tzv. “zamrzla” a neprojevila se.

Naopak při pomalém nárůstu napětí zareaguje elastická složka, děj pokračuje působením pístu a tím se dostaví relaxace napětí. Samostatná pružina představující podkladovou textilií je vždy omezována elastickou a viskózní složkou membrány.

Reologické modely reálných procesů v namáhaném materiálu jsou velmi komplikované, proto jimi skutečný průběh nárůstu tlaku a chování polymerů nevysvětlujeme podrobně.

Pro představu jevu, který nastane při měření vodního sloupce, vycházíme z následující úvahy. Pokud mluvíme o deformaci, uvažujeme rozpínání textilie a její rozměrové změny. Hydrostatický tlak působí na každé místo stejnou silou. Při nárůstu tlaku dochází k rozpínání textilie. Zvětšuje se její plocha, ale snižuje se její tloušťka, jak je patrné z následujícího obrázku 8.



Obrázek 14 - Rozpínání textilie při jednostranném působení hydrostatického tlaku

$$h_2 < h_1, p_{h2} > p_{h1}, S_2 > S_1$$

Tahové napětí  $\sigma$  [ N / m ] v rovině tenké textilie vztažené na jednotku šířky lze pak stanovit pomocí rovnice membrány:

$$p = \frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} \quad (10)$$

kde  $p$  je přetlak,  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  napětí – síla na jednotku délky,  $R_1$  a  $R_2$  poloměr (křivost) [13].

Předpokládáme, že výše uvedené skutečnosti ovlivňují vnitřní strukturu polopropustných membrán. Domníváme se, že u porézní membrány v důsledku

působícího tahového napětí dojde k roztažení pórů a u neporézní membrány a zátěru dojde ke vzniku trhlinek. Tyto snižují odolnost materiálu a dochází za působení kritických tlaků k průniku vody. Otázkou je, jak tento proces bude závislý na rychlosti nárůstu hydrostatického tlaku.

Uvažujeme dvě situace pro každou „extrémní“ rychlost. V *prvním* případě rychlého nárůstu tlaku by se napínala a roztahovala plocha měřeného vzorku rychleji a více, tedy dříve by došlo ke zvětšení pórů nebo k tvorbě trhlinek. Naměřili bychom tedy nízký vodní sloupec. V *druhé* úvaze je to přesně naopak. S ohledem na reologické vlastnosti polymerů by se při tzv. „rychlém měření“ napínala a roztahovala plocha měřeného vzorku sice také rychleji a více (než u „pomalého měření“), ale protože polymery reagují na změnu se zpožděním, není akt rychlého růstu napětí a změny vnitřní struktury materiálu (rozšíření pórů a vznik trhlinek) přímo úměrný. Přestože tedy roste napětí, materiál se deformuje se zpožděním, tudíž odolá vyššímu vodnímu sloupci.

Při pomalém nárůstu tlaku uvažujeme opět dvě situace. *První* říká, že rozměrová změna vzorku materiálu bude malá, nedojde k deformaci pórů ani vzniku trhlinek. Textilie by tedy při „pomalém měření“ teoreticky měla odolat vyššímu vodnímu sloupci. *Druhá* úvaha opět vychází z reologických vlastností. Přestože k deformaci polymerních materiálů dochází se zpožděním, nárůst tlaku je tak pomalý, že ke změně ve vnitřní struktuře - k roztažení pórů a vzniku trhlinek dojde. A to vše i při menší rozměrové změně materiálu. Materiál tedy v tomto případě odolá nižšímu vodnímu sloupci, než při rychlém měření.

Domníváme se, že se zvyšující se rychlostí nárůstu hydrostatického tlaku se bude zvyšovat i hydrostatická odolnost textilie – tedy míra vodního sloupce. Tato závislost by se měla lišit i dle druhu materiálu. Proto jsme zvolili dva druhy membrán a zátěr. Gore-Tex® Paclite® je konstruován jako lehký a skladný materiál, proto předpokládáme, že podkladová textilie nevydrží tlak vysokých vodních sloupců a dojde k přetrhu dřív, než proniknou tři kapky na povrch. Od neporézní membrány a zátěru očekáváme čitelné chování a přiměřené hodnoty s tím, že zátěr obecně dosahuje nižšího vodního sloupce. Otázkou je, jaký bude mít nárůst vodního sloupce se zvyšující se rychlostí měření průběh. Vše by mělo být zohledněno při popisu rozdílu mezi středně rychlou normovanou rychlostí a námi zvolenou vyšší rychlostí měření.

## **7. VZTAHY MEZI RYCHLOSTMI MĚŘENÍ, STANOVENÍ KOEFICIENTŮ**

Cílem práce je získat koeficienty pro přepočet vodního sloupce naměřeného „rychleji“ na hodnoty normované rychlosti. Pro statistické zpracování dat naměřených na plošných textiliích je běžně potřeba nejméně 5 naměřených hodnot pro každou rychlost a druh materiálu. Bohužel je volného materiálu nedostatek (zvláště pak membrán). Proto je počet celkových testovaných rychlostí omezen na tři a zároveň počet měření při každé rychlosti je rovněž roven třem. Usoudili jsme tak na základě prvních měření, kdy výsledné hodnoty od sebe nebyly výrazně odlišné. Dodatečná měření jsme volily taktéž na základě množství materiálu.

Kvůli statisticky nízkému počtu měření vyvstává otázka, jak data popsat a jak je použít. Konkrétní závěry lze tedy aplikovat pouze na konkrétní měřené textilie a ne na typově stejné materiály.

## PRAKTICKÁ ČÁST

### 8. STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Na základě teoretického výkladu a hypotéz můžeme jednoznačně stanovit cíle praktické části. V úvodu změříme na přístroji PERMETEST hodnoty paropropustnosti textilií a porovnáme je s průměrnou hodnotou naměřeného vodního sloupce. Škálu komplexních informací doplníme o hodnotu propustnosti textilie pro vzduch naměřenou přístrojem FX 3300. Další kroky se budou týkat hydrostatické odolnosti.

Změříme hodnoty vodního sloupce v závislosti na rychlosti růstu hydrostatického tlaku. Těmito hodnotami u všech textilií budou 10 cm H<sub>2</sub>O/min – pomalu (norma), 60 cm H<sub>2</sub>O/min – středně rychle (norma) a 150 cm H<sub>2</sub>O/min – rychle. Sestrojíme graf závislosti měřené výšky vodního sloupce na čase pro každou rychlost a to vše pro každou textilii. Výsledky budeme interpretovat nejdříve z hlediska rychlosti nárůstu tlaku, poté z hlediska druhu materiálu.

Provedeme statistické zpracování dat, kterým popíšeme konkrétní měřené materiály. Pro obecně platné závěry provedeme dodatečný test. Pomocí fotoaparátu na materiálu s neporézní membránou zachytíme u všech rychlostí průběh vzrůstajícího napětí, kdy současně zaznamenáme výšku narůstajícího vrchlíku. Cílem je zjistit vzájemný vztah mezi rychlostmi měření a rozměrovou změnou materiálu.

Po provedení všech měření sestavíme komplexní diagramy. Nejprve porovnáme čas měření v závislosti na dosažené výšce vodního sloupce. Z těchto parametrů určíme koeficienty pro přepočet mezi rychlostmi 60 a 150 cmH<sub>2</sub>O/min. Poté se zaměříme na vztah mezi výškou vodního sloupce a dynamikou jeho nárůstu. Z tohoto vztahu odvodíme změnu hydrostatické odolnosti v důsledku rychlosti měření.

V závěru budeme diskutovat dosažené výsledky.

## 9. VÝPARNÝ ODPOR

Měření na přístroji PERMETEST probíhalo při teplotě 22°C a při relativní vlhkosti vzduchu 30%.

	Výparný odpor [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ]				Relativní paropropustnost [%]			
	1.	2.	3.	prům.	1.	2.	3.	prům.
1. porézní m.	5,2	5,3	5,2	5,23	48,2	47,7	47,7	47,87
2. neporézní m.	8,1	9,5	8,6	8,73	38,2	34,5	37,6	36,77
3. zátěr	10,8	8,7	9,6	9,70	30,8	38,1	33,5	34,13

Tabulka 1 - Výparný odpor a relativní paropropustnost textilií

Za stanovených podmínek má nejnižší výparný odpor a zároveň nejvyšší relativní paropropustnost porézní membrána GoreTex® Paclite®, následuje neporézní membrána AlpinePro PTX a nejhorší výparný odpor s nízkou relativní paropropustností má ze tří vzorků zátěr AlpinePro Aquacore . Tyto hodnoty se však stále řadí dle rozdělení v teoretické části do skupiny velmi dobré (1.) a dobré (2.,3.).

### 9.1 Výparný odpor v závislosti na vodním sloupci

Ideální textilie by měla vysokou hydrostatickou odolnost současně s nízkým výparným odporem. V praxi však není jednoduché tohoto stavu dosáhnout, je totiž upřednostněn jeden parametr na úkor druhého. Mezi měřenými materiály porovnáváme průměrnou výšku maximálního naměřeného vodního sloupce dosaženou při normované rychlosti ( $60 \text{ cm}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a průměrnou hodnotu výparného odporu (viz.tabulka 2)

	Průměr - cmH <sub>2</sub> O [60 cm. H <sub>2</sub> O.min <sup>-1</sup> ]	Průměr - výparný odpor [Pa.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> ]
1. porézní m.	1923	5,23
2. neporézní m.	2194	8,73
3. zátěr	971	9,70

Tabulka 2 - Průměrné hodnoty daných parametrů

Jak je z tabulky patrné, neporézní zátěr zastupuje variantu nízkého cmH<sub>2</sub>O a vyššího R<sub>et</sub>. Zátěry jsou charakteristické vyšší elasticitou a nízkou mechanickou odolností. Proto výsledky, ačkoliv nejsou vynikající, odpovídají povaze materiálu a způsobu běžného použití.

Druhou variantu převahy jedné vlastnosti zastupuje neporézní membrána, kde dominuje vodní sloupec, nicméně průměrný R<sub>et</sub> ~ 8,73 patří stále do kategorie „dobrý“. V cenovém poměru s porézní membránou bychom si materiál vybrali především pro jeho hydrostatickou odolnost s odpovídající paropropustností.

Nejlepším z měřených materiálů je porézní membrána, která v průměru dosahuje vysokého vodního sloupce zároveň s nízkým výparným odporem. Tento materiál zastupuje třetí, nejpříznivější variantu z uvedených poměrů a nejvíce se přibližuje ideálnímu poměru.

## 10. HODNOCENÍ PROPUSTNOSTI TEXTILÍ PRO VZDUCH

Na přístroji FX 3300 jsme měřili materiály s rozdílem tlaků 100 kPa, testovaná plocha byla 5 cm<sup>2</sup>. Předpokládali jsme 100% nepropustnost vzduchu, což se potvrdilo. Každý vzorek byl změřen na třech různých místech textilie, kde bylo vždy dosaženo hodnot prodyšnosti 0 m.s<sup>-1</sup>.

## 11. MĚŘENÍ HYDROSTATICKÉ ODOLNOSTI TEXTILIÍ

Uvedené tři materiály byly měřeny třemi rychlostmi nárůstu tlaku, z čehož každá rychlost byla měřena třikrát. Více měření se nepředpokládalo z důvodu nedostatku materiálu.

### 11.1 Podmínky měření dle normy ISO 811:1981

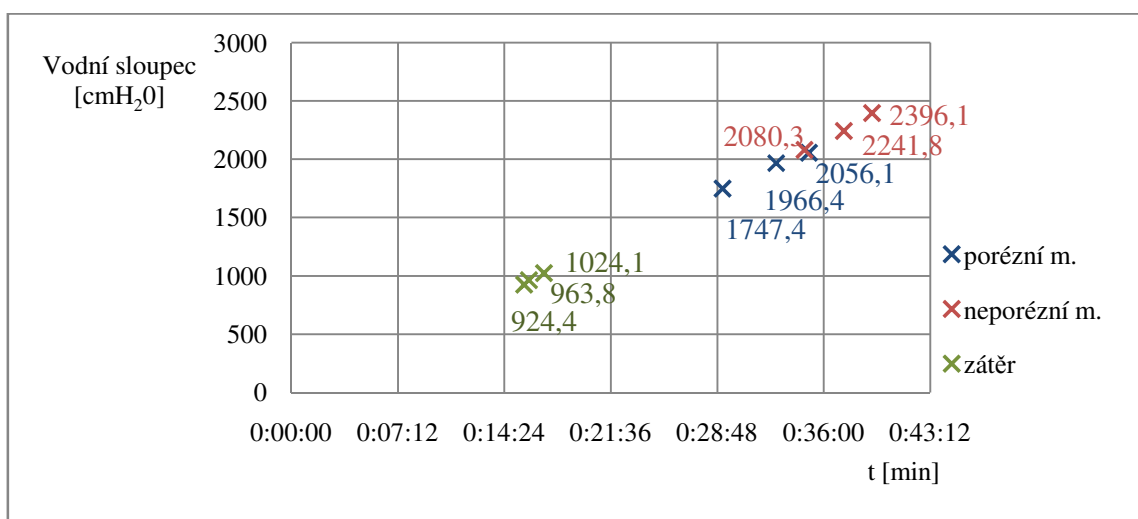
- vodorovné umístění přístroje
- teplota ovzduší 22°C, teplota destilované vody 21°C
- tlak vody působil z lící strany, upnutá plocha textilie 100cm<sup>2</sup>
- v upínaných místech neprosakovala voda ani neprokluzovala látka
- rychlost měření byla 10, 60 a 150 cmH<sub>2</sub>O/min

### 11.2 Rychlost nárůstu tlaku 60 cmH<sub>2</sub>O/min – norma, středně rychle

Jak je patrné z následující tabulky 3, naměřené hodnoty vodního sloupce membrán jsou výrazně vyšší, než hodnoty vodního sloupce zátěru. V průměru je jeho hydrostatická odolnost 9,7 mH<sub>2</sub>O, což je téměř o polovinu méně oproti membránám. Tato skutečnost je obdobná u všech rychlostí měření, což potvrzuje charakter zátěrových materiálů. Doba dosažení kritického tlaku u zátěru je analogicky také kratší, v průměru 16 minut.

		60 cmH <sub>2</sub> O/min				
		1.	2.	3.	prům.	směr.odch.
1.porézní m.	cm/H <sub>2</sub> O	P 2056,1	1966,4	1747,4	1923,3	158,8
	čas	0:35:00	0:32:48	0:29:09	0:32:19	-
2. neporézní m.	cm/H <sub>2</sub> O	2241,8	2396,1	2080,3	2239,4	157,9
	čas	0:37:21	0:39:15	0:34:42	0:37:06	-
3. zátěr	cm/H <sub>2</sub> O	1024,1	924,4	963,8	970,7	50,2
	čas	0:17:04	0:15:44	0:16:04	0:16:17	-

Tabulka 3 - Hodnoty vodního sloupce a času odpovídající rychlosti 60 cmH<sub>2</sub>O/min

Graf 3 – Hodnoty vodního sloupce dosažené při 60 cmH<sub>2</sub>O/min

Porovnáním porézní a neporézní membrány zjišťujeme, že neporézní AlpinePro PTX dosahuje za uvedené rychlosti měření vyšší hydrostatické odolnosti (v průměru 2245 cmH<sub>2</sub>O), než porézní GoreTex® Paclite® (v průměru 1923 cmH<sub>2</sub>O). Domníváme se, že samotná porézní membrána by odolala i vyššímu tlaku, limitují ji však mechanické vlastnosti podkladové textilie. Proto při 2056 cmH<sub>2</sub>O došlo k přetrhu dříve, než se objevila na povrchu první kapka. Čas měření je oproti zátěru přibližně dvojnásobný, čili v průměrném rozmezí od 32 do 37 minut.

### 11.3 Rychlost nárůstu tlaku 10 cmH<sub>2</sub>O/min – norma, pomalé měření

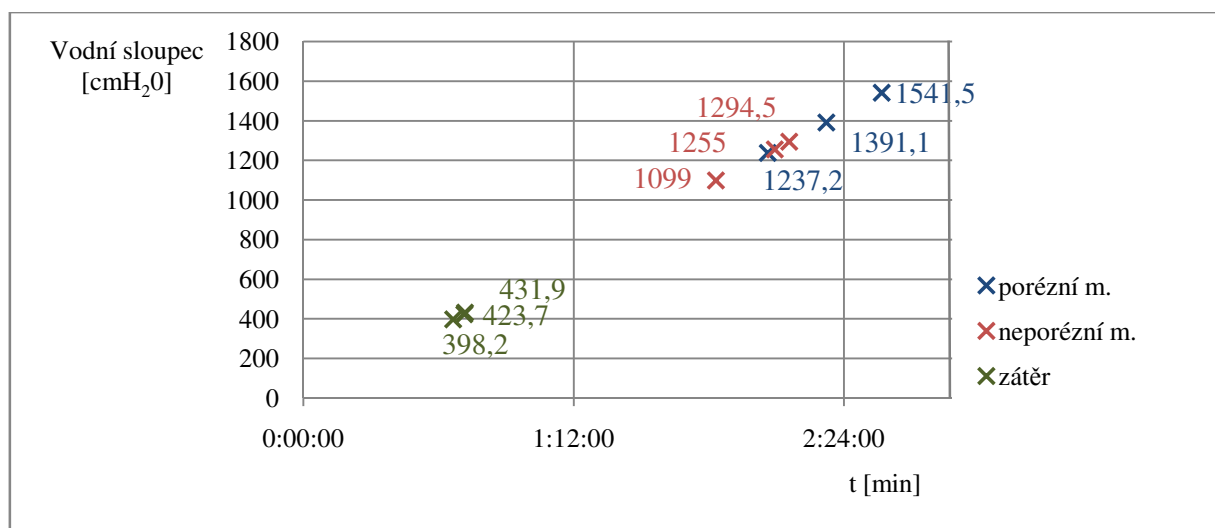
Protože měříme pomaleji, doba měření je logicky delší. Materiály ale také odolávají o poznání nižšímu tlaku vody. Tímto se potvrzuje druhá z teorií, která říká, že s pomalým nárůstem tlaku, tedy s delším působením napětí dochází k plastické deformaci vnitřní struktury materiálu sice později, ale při nižších hodnotách vodního sloupce.

Zátěr je opět odolný hydrostatickému tlaku nejméně. Mezi porézní a neporézní membránou je stejně jako v předchozím měření v průměru rozdíl 200 – 300 cmH<sub>2</sub>O, nicméně tentokrát odolává vyššímu hydrostatickému tlaku membrána porézní.

Protože výsledky měření těchto dvou normovaných rychlostí jsou rozdílné, je důležité při prezentaci hodnot uvádět i rychlost měření, při které byly dosaženy.



		10 cmH <sub>2</sub> O/min				
		1.	2.	3.	prům.	směr.o.
1. porézní m.	cm/H <sub>2</sub> O	1391,1	1237,2	1541,5	1389,9	152,2
	čas	2:19:17	2:03:45	2:34:04	2:19:02	-
2. neporézní	cm/H <sub>2</sub> O	1294,5	1099,0	1255	1216,2	103,4
	čas	2:09:27	1:49:56	2:05:38	2:01:40	-
3. zátěr	cm/H <sub>2</sub> O	398,2	423,7	431,9	417,9	17,6
	čas	0:39:58	0:42:56	0:43:07	0:42:00	-

Tabulka 4 - Hodnoty vodního sloupce a času odpovídající rychlosti 10 cmH<sub>2</sub>O/minGraf 4 – Hodnoty vodního sloupce dosažené při 10 cmH<sub>2</sub>O/min

#### 11.4 Rychlost nárůstu tlaku 150 cmH<sub>2</sub>O/min

Pro zástupce vyšší, než normované rychlosti jsme zvolili 150 cmH<sub>2</sub>O/min. Záměrem bylo zvolit dvojnásobek středně rychlé normované rychlosti, ale přístroj je od 100 cmH<sub>2</sub>O/min odstupňován po 50 cmH<sub>2</sub>O/min.

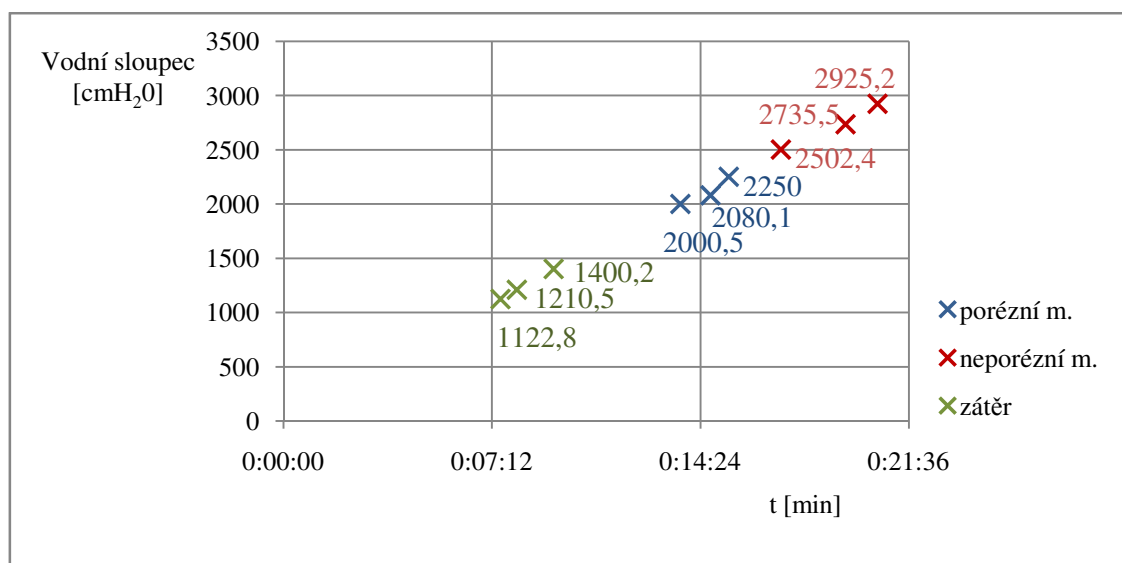
V první řadě jsme potvrdili to, že výsledky kolísají ve stejném rozmezí, jako u měření s nižší rychlostí. Poté jsme potvrdili hypotézu, že s rostoucí rychlostí nárůstu tlaku roste i míra vodního sloupce.

Zátěr se tradičně pohybuje v nižších hodnotách, nicméně následuje stejnou tendenci jako ostatní materiály. Měření vodního sloupce skončilo u porézní membrány opět přetřhem při dosažení kritického tlaku cca 2000 cmH<sub>2</sub>O. Jak je uvedeno v následujícím článku, každé hodnotě vodního sloupce odpovídá stejná míra deformace materiálu (doloženo dle výsledků měření jen u rychlostí 60-150 cmH<sub>2</sub>O/min materiálu AlpinePro PTX). Rozdíl je pouze v čase, kdy dojde ke kritickému narušení struktury. Pokud tedy deformace materiálu vlivem tlaku dosáhne určitého stavu, dojde k porušení struktury membrány neohledě na rychlost měření a dojde k průniku kapek.

Konkrétní hodnoty jsou zaznamenány v následující tabulce 5.

		150 cmH <sub>2</sub> O/min				
		1.	2.	3.	prům.	směr.o.
1.porézní m.	cm/H <sub>2</sub> O	P 2000,5	P 2080,1	2250,0	2110,2	127,44
	čas	0:13:43	0:14:45	0:15:23	0:14:37	-
2.neporézní m.	cm/H <sub>2</sub> O	2925,2	2735,5	2502,4	2721,0	211,8
	čas	0:20:31	0:19:25	0:17:11	0:19:02	-
3. zátěr	cm/H <sub>2</sub> O	1122,8	1400,2	1210,5	1244,5	141,79
	čas	0:07:30	0:09:20	0:08:04	0:07:30	-

Tabulka 5 - Hodnoty vodního sloupce a času odpovídající rychlosti 10 cmH<sub>2</sub>O/min



Graf 5 – Hodnoty vodního sloupce dosažené při 150 cmH<sub>2</sub>O/min

Míra vodního sloupce neporézní membrány dosahuje ze všech dosavadních měření nejvyšších hodnot v průměru 2721 cmH<sub>2</sub>O, kde měření končí průnikem tří kapek bez přetrhu materiálu. Na základě reologických znalostí můžeme teoreticky odvodit příčinu a tedy potvrdit jednu z hypotéz. Polymery reagují na mechanické namáhání se zpožděním. Při rychlém nárůstu tlaku je kvůli tomuto zpoždění dosaženo vyšší hodnoty vodního sloupce. Ve srovnání s porézní PTFE membránou má neporézní PUR také vyšší tažnost a odolnější podkladovou textilií vůči mechanickému namáhání.

Porézní membránový materiál také reaguje se zpožděním. Kvůli rychlému nárůstu tlaku je také dosaženo vyššího vodního sloupce v krátkém čase, ale po překročení mezních hodnot dojde k přetrhu dříve, než pronikne kapka na povrch.

Zátěr známý dobrou elasticitou bude při vyšší rychlosti měření reagovat také se zpožděním, ale kvůli obecně zhoršené mechanické odolnosti bude zpoždění méně výrazné. To je příčinou skutečnosti, že výsledný vodní sloupec se u zátěru neliší od výsledků rychlosti 60 cmH<sub>2</sub>O/min tak výrazně, jako ostatní.

## 12. ROZMĚROVÉ ZMĚNY MATERIÁLŮ

Při nárůstu hydrostatického tlaku v přístroji dochází k rozpínání upevněné textilie. S využitím tohoto jevu můžeme zmapovat průběh napětí. Z důvodu dodatečného doměření a nedostatku materiálu jsme tento krok realizovali pouze s jedním druhem – neporézní membránou AlpinePro PTX. Nemůžeme tedy těmito výsledky definovat všechny tři textilie jednoznačně, nicméně na základě pozorování předchozích měření usuzujeme, že se zbylé materiály nechovají výrazně odlišně. Pořízení dat mělo několik úskalí, které jsme se snažili co nejvíce eliminovat, v opačném případě k nim musíme přihlédnout při vyhodnocení výsledků.

Na zadní stranu přítlačné hlavice byl umístěn milimetrový papír se stupnicí tak, aby nulová hodnota ležela při upnutí textilie přímo v její úrovni. Záznam jsme pořídili pomocí fotoaparátu. Jeho postavení bylo z druhé strany přítlačné hlavice tak, aby čočka mířila přímo na osu středu vrchlíku a dále pak na milimetrový papír se stupnicí. Správně bychom měli sejmout hodnotu při nárůstu vrchlíku vždy pohledem kolmo na stupnici, což manuálně pomocí fotoaparátu není možné přesně zachytit. Na základě předchozích měření jsme usoudili, že vrchlík dosahuje maximálních výšek v rozmezí 3 – 4 cm. Optickou čočku jsme tedy namířili do středu rozmezí 0 – 4 cm, respektive do výšky 2 cm. Hodnoty pod touto hranicí vidíme jako nižší, naopak nad ní jako vyšší. K tomuto faktu musíme při vyhodnocení přihlédnout, ale v uvedeném rozmezí hodnot jsou rozdíly nepatrné.

Další překážkou při měření byl široký spodní lem přítlačné hlavice. Z pohledu fotoaparátu zastiňoval první 1,5 cm stupnice, proto není zmapován úplný počátek nárůstu. Nakonec z měření ale vyplynulo, že tendence nárůstu vrchlíku je lineární a odhadnuté počáteční hodnoty toto tvrzení nevyvrací.

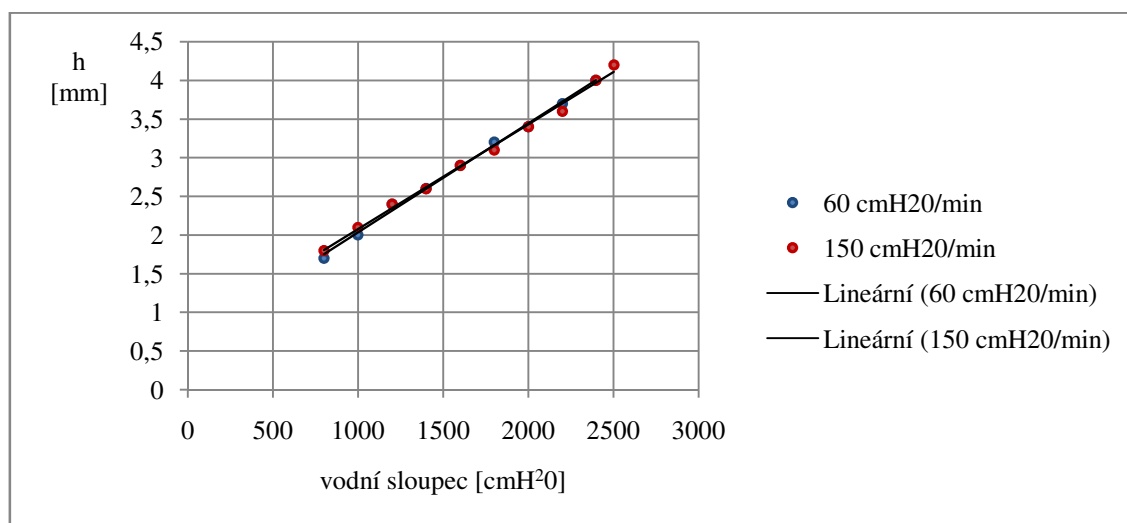
Měření probíhalo při stejné teplotě vzduchu, jako u všech předchozích měření, tedy 22°C. Zaznamenávali jsme hodnoty růstu po 100 cmH<sub>2</sub>O. Fotoaparát byl po všechny měření ve stejné poloze. Záznam je dostupný v příloze 1 až 3.

### 12.1 Rozměrová změna – porovnání 60 cmH<sub>2</sub>O/min a 150 cmH<sub>2</sub>O/min

Celkem jsme pořídili 18 a 19 záznamů, přičemž pro účely konstrukce grafu a vyhodnocení zařadíme pouze polovinu hodnot. Jak je totiž na první pohled patrné z tabulky 6, rozdíl výšky vrchlíku se mezi dvěma rychlostmi liší nejvýše o 0,1 cm. Pracujeme s hodnotami od 7 mH<sub>2</sub>O respektive od 1,6 a 1,7 cm.

	cmH <sub>2</sub> O	800	1000	1200	1400	1600
<b>60 cmH<sub>2</sub>O/min</b>	<b>h [cm]</b>	1,7	2,0	2,4	2,6	2,9
<b>150 cmH<sub>2</sub>O/min</b>	<b>h [cm]</b>	1,8	2,1	2,4	2,6	2,9
	cmH <sub>2</sub> O	1800	2000	2200	2396	2502
<b>60 cmH<sub>2</sub>O/min</b>	<b>h [cm]</b>	3,2	3,4	3,7	4,0	-
<b>150 cmH<sub>2</sub>O/min</b>	<b>h [cm]</b>	3,1	3,4	3,6	4,0	4,2

Tabulka 6 - Výška vrchlíku daného vodního sloupce v porovnání dvou rychlostí



Graf 6 – Závislost výšky vrchlíku namáhané textilie na výšce vodního sloupce při dvou rychlostech nárůstu tlaku (60 cmH<sub>2</sub>O/min, 150 cmH<sub>2</sub>O/min)

Rozdíl výsledné míry vodního sloupce mezi různými rychlostmi není tak značný, jako u ostatních měření. Domníváme se ale, že závěr je platný i při dosahování vyšší hydrostatické odolnosti (dle předcházejícího měření až do 2721 mH<sub>2</sub>O).

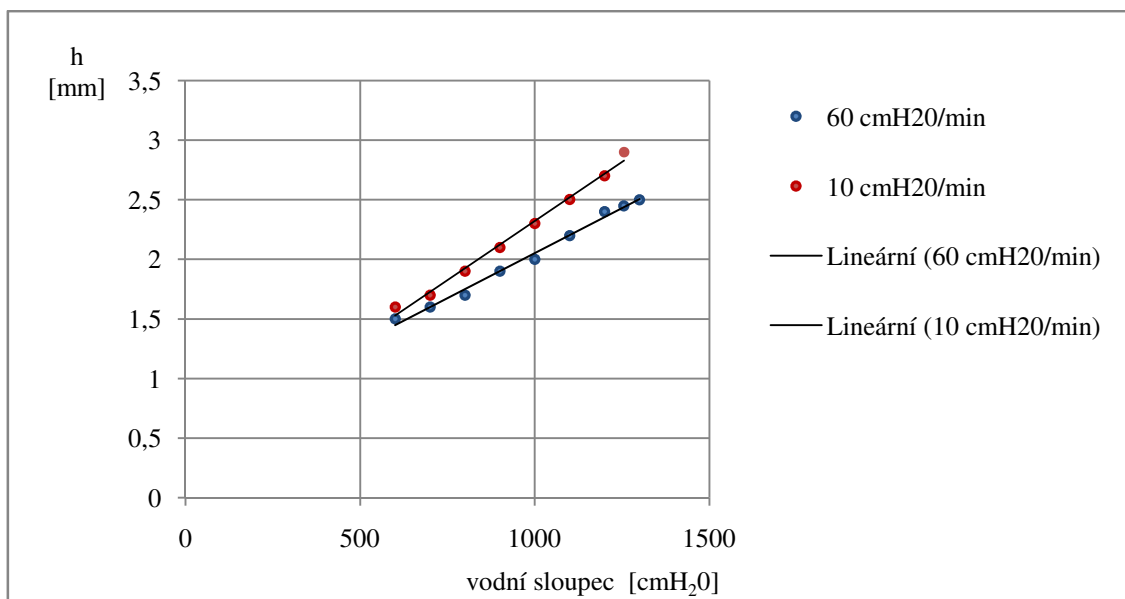
Grafické zobrazení potvrzuje, že jednotlivé výchyly mezi pravidelnými vzdálenostmi hodnot jsou natolik malé, že nárůst napětí v rozmezí těchto rychlostí můžeme považovat za lineární. Pokud je tedy dosaženo při rychlejším nárůstu tlaku i vyššího vodního sloupce, domníváme se, že bude tento nárůst stejně lineární jako při rychlosti 60 cmH<sub>2</sub>O/min, jen bude probíhat rychleji a tedy bude dosaženo vyšších hodnot vodního sloupce.

### 12.2 Rozměrová změna – porovnání 10 cmH<sub>2</sub>O/min a 60 cmH<sub>2</sub>O/min

Výsledky nízké rychlosti měření jsou mírně odlišné od ostatních. Jak již bylo uvedeno dříve, při pomalém nárůstu tlaku bude *celková rozměrová změna materiálu* při průniku tří kapek v porovnání ostatních rychlostí *menší*. *Jednotlivé kroky* nárůstu vrchlíku (viz. tabulka 7) však budou v porovnání *větší*, protože je jimi dosaženo určitého nižšího kritického vodního sloupce za delší čas. Křivka závislosti vodního sloupce na výšce vrchlíku tedy bude mít kolmější sklon, jak je znázorněno v grafu 8.

	cmH <sub>2</sub> O	600	700	800	900	1000	1100	1200	1255	1300
<b>10 cmH<sub>2</sub>O/min</b>	<b>h [cm]</b>	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	-
<b>60 cmH<sub>2</sub>O/min</b>	<b>h [cm]</b>	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	-	2,5

Tabulka 7 - Výška vrchlíku daného vodního sloupce v porovnání dvou rychlostí



Graf 7 - Závislost výšky vrchlíku namáhaného materiálu na výšce vodního sloupce při dvou rychlostech nárůstu tlaku (10 cmH<sub>2</sub>O/min, 60 cmH<sub>2</sub>O/min)

Jinak řečeno při porovnatelné míře vodního sloupce je výška vrchlíku u rychlosti 10 cmH<sub>2</sub>O/min větší, než u rychlosti 60 cmH<sub>2</sub>O/min, ale ve výsledku měření končí při nízkých hodnotách vodního sloupce.

### 13. ZÁVISLOST RYCHLOSTI MĚŘENÍ NA MÍŘE VODNÍHO SLOUPCE DLE DRUHU TEXTILIÍ

V této kapitole se na zkoumaný jev zaměříme z hlediska odlišných druhů materiálu. Protože cílem práce je určit vztah mezi normovanou a vyšší rychlostí měření, soustředíme se na porovnání právě mezi 60 cmH<sub>2</sub>O/min a 150 cmH<sub>2</sub>O/min.

V první řadě analyzujeme neporézní membránu AlpinePro PTX. Při rychlosti 150 cmH<sub>2</sub>O/min dosahuje v průměru o 476 cmH<sub>2</sub>O vyšších hodnot vodního sloupce. Deformaci materiálu jsme odvodili jako lineární. Měření je také v průměru při této rychlosti o 18 minut kratší a končilo jednoznačným proniknutím tří kapek na povrch.

Neporézní zátěr AlpinePro Aquacore vykazuje velmi podobnou tendenci jako membrána. Přestože neproběhla jeho rozměrová dokumentace, předpokládáme taktéž lineární nárůst vrchlíku. Měření končilo jednoznačným proniknutím tří kapek na povrch. Celkový průměrný rozdíl oproti normované rychlosti je pouze 274 cmH<sub>2</sub>O, avšak délka měření je o 8 minut kratší.

Se zvyšováním rychlosti roste nejméně míra vodního sloupce u porézní membrány. Celkový trend je snížen především tím, že v určité kritické hodnotě (u GoreTex Paclite v průměru 2045 cmH<sub>2</sub>O) dojde k přetrhu. V průměru se hydrostatická odolnost liší tedy pouze o 187 cmH<sub>2</sub>O, čas je ovšem více jak o polovinu – tedy o 18 minut kratší.

V příloze 3 je zařazena tabulka kompletních hodnot a v příloze 4 graf závislosti vodního sloupce na době měření, který komplexně zobrazuje výše uvedené závěry a především jednu z hlavních myšlenek zvyšování hydrostatické odolnosti s rychlejším nárůstem působícího tlaku.



### 13.1 Stanovení koeficientů

V následující tabulce 8 jsou uvedeny koeficienty z naměřených hodnot dvou zkoumaných rychlostí. Vodní sloupec je při měření rychlostí 150 cmH<sub>2</sub>O/min v průměru 1,2 x vyšší a délka měření je v průměru 0,5 x kratší.

	Poměr mezi 60 cmH <sub>2</sub> O/min a 150 cmH <sub>2</sub> O/min - z průměrných naměřených hodnot	
	vodní sloupec	čas
1. porézní membrána	1,097	0,469
2. neporézní membrána	1,215	0,514
3. zátěr	1,282	0,500

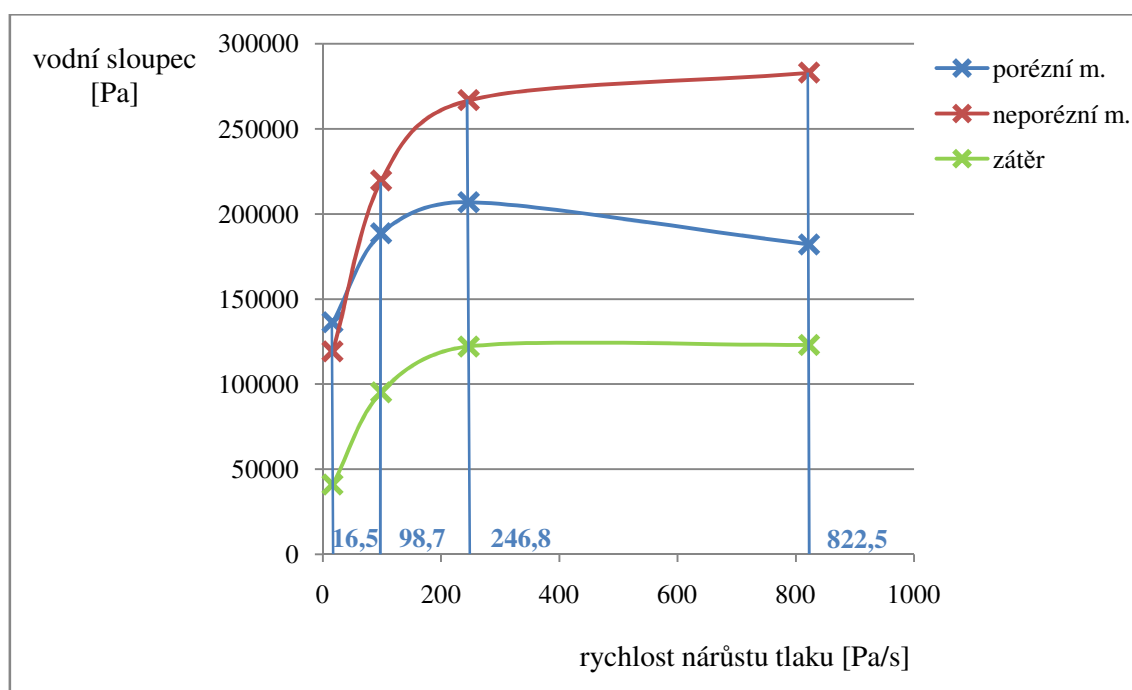
Tabulka 8 – Koeficienty pro přepočet vodního sloupce naměřeného vyšší rychlostí na hodnoty odpovídající měření normovanou rychlostí.

### 13.2 Dynamika nárůstu vodního sloupce

Z následujícího vztahu (znázorněného v grafu 9) je patrné, jak se vyvíjí vodní sloupec v závislosti na změně rychlosti. Jednotky vodního sloupce jsme převedli na základní jednotky hydrostatického tlaku, protože případný přístroj pro rychlé měření by pracoval právě s těmito jednotkami. Zde je tabulka 9, která obsahuje průměrné naměřené hodnoty zaznamenané v obou jednotkách (cmH<sub>2</sub>O a Pa). Naměřené hodnoty je pak možné snadno přepočítat na metry vodního sloupce a dále pomocí koeficientu na normované hodnoty, abychom zjistili míru hydrostatické odolnosti porovnatelnou s ostatními.

	cmH <sub>2</sub> O/min	10	60	150	500
	Pa/s	16,5	98,7	246,8	822,5
1. porézní m.	cmH <sub>2</sub> O	1389,7	1923,3	2110,2	1856,3
	Pa	136255	188559	206882	181990
2. neporézní m.	cmH <sub>2</sub> O	1216,2	2239,4	2721	2885,7
	Pa	119235	219549	266765	282912
3.zátěr	cmH <sub>2</sub> O	417,9	970,8	1244,5	1254,3
	Pa	40971	95176	122010	122971

Tabulka 9 – Průměrné hodnoty měření uvedené ve dvou jednotkách



Graf 8 – Vývoj kritické hydrostatické odolnosti v závislosti na rychlosti nárůstu tlaku

Nejdynamičtější změnu do rychlosti 150 cmH<sub>2</sub>O/min (246,8 Pa) zaznamenala neporézní membrána, porézní membrána a zátěr jsou si v tomto aspektu podobné. Na první pohled je patrné, že vodní sloupec se zvyšující se rychlostí nárůstu tlaku roste, to

však pouze právě do rychlosti přibližně 150 cmH<sub>2</sub>O/min. Tato vlastnost je společná pro všechny tři druhy textilie. Poté se každý druh chová rozdílně.

U textilie s porézní membránou dochází k přetrhu již kolem 2000 cmH<sub>2</sub>O. Při nejvyšší testované rychlosti 500 cmH<sub>2</sub>O/min však došlo k přetrhu již v 1856 cmH<sub>2</sub>O. Bylo prováděno jedno měření, proto nelze objektivně stanovit, zda výška vodního sloupce opravdu klesá, nebo jen stagnuje. Důležitá je však skutečnost, že již nebude narůstat.

Textilie s neporézní membránou prochází nejdynamičtější změnou, dá se říct v celém rozmezí rychlostí od 10 do 150 cmH<sub>2</sub>O/min. Za touto přibližnou hranicí je nárůst tlaku pozvolný a dosahuje míry až 2886 cmH<sub>2</sub>O za pouhých 7 minut, což je oproti střední normované rychlosti až 5x kratší čas. Protože jsme měřili pouze jednou, není možné stanovit jednoznačné závěry. Teoreticky však lze předpokládat, že pokud textilie odolá mechanickému namáhání způsobenému v tomto případě extrémním hydrostatickým tlakem, je možné měřit její hydrostatickou odolnost i tímto nejrychlejším způsobem.

Zátěrová textilie i při nejrychlejším nárůstu tlaku vykazuje stejnou hydrostatickou odolnost. Opět z důvodu nedostatku materiálu jsme provedli pouze jedno měření nejvyšší rychlostí, to se však od hodnot rychlosti 150 cmH<sub>2</sub>O/min výrazně nelišilo, respektive bylo přibližně stejné. Tedy mluvíme-li o vodním sloupci. Délka měření ale byla ještě o 5 minut v průměru kratší, tedy 3 minuty. Teoreticky tedy opět uvažujeme možnost měření i při nejvyšších rychlostech, které je oproti normované střednědobé rychlosti až 8x kratší. To jsou ovšem domněnky, které je třeba potvrdit dalšími měřeními.

V rámci této práce je významná rychlost 150 cmH<sub>2</sub>O/min, která je dle předchozích odstavců optimální k měření vyšších, než normovaných rychlostí a to s úsporou času v poměru o polovinu.

## ZÁVĚR

Norma pro měření hydrostatické odolnosti stanovuje rychlost nárůstu hydrostatického tlaku na 10 nebo 60 cmH<sub>2</sub>O/min. Pokud jsou měřeny méně hydrostaticky odolné materiály, je i za podmínek z normovaných rychlostí dosaženo kritického tlaku poměrně rychle.

V současnosti se ale vyvíjejí stále odolnější textilie pro náročnější použití, jejichž vodní sloupce jsou daleko vyšší. Takovými jsou například polopropustné membrány, které jsme zvolili právě pro testování v této práci. Jejich doba měření při pomalejším normovaném nárůstu tlaku je v průměru u textilie s porézní membránou 2h 90min, s neporézní membránou 2h 2 min a se zátěrem 42 min. Tato doba testování je ekonomicky velmi nevýhodná. Další možností je tedy vyšší normovaná rychlost, kde se v průměru pohybuje doba měření u textilie s porézní membránou 32 min, s neporézní membránou 37 min a se zátěrem 17 min. U vysoce hydrostaticky odolných materiálů je toto měření rovněž zdlouhavé. Časová náročnost je zdůrazňována především proto, že průnik tří kapek se dosud detekuje nikoliv exaktně pomocí přístroje, nýbrž empiricky pouze pomocí zraku. Obsluha stroje tak musí být přítomna po celou dobu testování.

Konkrétní testované polopropustné textilie dosahují při vyšší z normovaných rychlostí vodních sloupců od cca 10 do 22 mH<sub>2</sub>O. V současnosti se však konstruují textilie s daleko vyšší odolností a to 30 až 40 mH<sub>2</sub>O. Doba testování dle současné normy se tak výrazně prodlužuje a samotné přístroje již nejsou pro tak vysoký tlak přizpůsobeny. Právě z tohoto důvodu analyzujeme měření při dvou normovaných rychlostech a především při rychlosti vyšší pro zkrácení doby testování.

Polopropustné textilie patří k obtížně dostupným materiálům. Proto testujeme od každého základního typu jednu textilií. Na základě množství materiálu jsme také určovali počet měření. Minimální ideální počet by byl 5 na každou rychlost a textilií. Materiál však vystačil pouze na tři měření s tím, že nejvyšší možný nárůst tlaku jsme si mohli dovolit testovat jen jednou. Ve výsledku se však směrodatná odchylka pohybovala pouze v rozmezí 1-2 mH<sub>2</sub>O, u zátěru dokonce ještě méně. Proto si z dosažených výsledků v rámci této práce dovolujeme vycházet. V případě dostatečného množství textilií by bylo vhodné zhotovit nejen více měření, ale zvolit i

další rychlosti nárůstu tlaku pro detailnější popis dynamiky nárůstu tlaku. Důležité je také zmínit, že měření probíhalo jen na polopropustných membránách, proto se výsledky vztahují pouze na tento druh textilií. (Chování ostatních druhů textilií můžeme z výsledků pouze předpokládat.)

Prvním důležitým poznatkem je jev, kdy za pomalého nárůstu tlaku textilie vykazuje nižší hydrostatickou odolnost, zatímco za rychlého nárůstu tlaku vykazuje vyšší hydrostatickou odolnost. Tato skutečnost má spojitost i s výškou kulového vrchlíku, který se tvoří z upnuté textilie vlivem působení tlaku. Při pomalém nárůstu se tvoří nižší vrchlík a tedy i celková deformace textilie je menší. Přesto je kritická hydrostatická odolnost nízká. Naopak při rychlém nárůstu napětí se tvoří vyšší kulový vrchlík a celková deformace textilie je tedy daleko vyšší. Přesto vykazuje i vyšší hydrostatickou odolnost.

Tento jev vysvětlujeme reologickým chováním polopropustných membrán jakožto polymerních materiálů. Tyto reagují na mechanické namáhání se zpožděním. Při rychlém nárůstu (v tomto případě už od 60 cmH<sub>2</sub>O/min) tedy „nestíhají“ reagovat na změnu tlaku, stane se tak až později za vyšších tlaků. Předpokládáme, že se nakonec u hydrofobních membrán rozevrou póry jak vlivem roztažení textilie, tak vlivem působení vysokého tlaku a dojde k průniku kapek. U hydrofilních membrán vlivem jejich již nízké tloušťky dochází k snadnějšímu průchodu vlhkosti, dokonce uvažujeme i vznik trhlinek. Při pomalém nárůstu (10 cmH<sub>2</sub>O/min) jsou membrány vystaveny dlouhému působení napětí, proto na něj „stíhají“ reagovat a k přeměně vnitřní struktury dochází už při nízkých tlacích. K největším rozdílům v dynamice nárůstu tlaku dochází právě v rozmezí dvou normovaných rychlostí a toto rozmezí by bylo vhodné samostatně prozkoumat.

Protože se v této práci zabýváme urychlením procesu měření, soustředíme se na vztah mezi rychlostmi 60 - 150 cmH<sub>2</sub>O/min a vyšší. Dynamika nárůstu vodního sloupce je nejvyšší u neporézní membrány a nejnižší u porézní, což je způsobeno i jejím přetrhem. Z námi provedených měření vyplývá, že vodní sloupec je při rychlejším měření vyšší pouze cca o 2 až 5 mH<sub>2</sub>O dle druhu textilie, ale je ho dosaženo v daleko kratším čase a to v průměru polovičním. Textilie, u kterých předpokládáme vysokou hydrostatickou odolnost a tedy i dlouhou dobu testování, můžeme měřit jednou tak vyšší, než normovanou rychlostí a čas testování zkrátíme na polovinu.

Pro platný přepočet vodního sloupce naměřeného při 150 cmH<sub>2</sub>O/min na hodnoty odpovídajícím normované rychlosti by bylo třeba provést daleko více měření u každého druhu textilie. Z našeho zjednodušeného testování vyplývá (konkrétně viz. tabulka 8), že tento koeficient se u jednotlivých druhů polopropustných membrán výrazně neliší a v jejich společném průměru je cca 1,2.

Dále jsme s posledním vzorkem materiálu jednou testovali maximální možnou nastavitelnou rychlost nárůstu tlaku, která byla 500 cmH<sub>2</sub>O/min. Přestože výsledky měření nejsou dostatečně objektivní, dovoluujeme si na jejich základě předpokládat chování testovaných textilií i za hranicí vyššího nárůstu tlaku, než je 150 cmH<sub>2</sub>O/min. Výsledek je takový, že dynamika jeho nárůstu v porovnání s předchozími průběhy je velmi nízká. (Pozn. u porézní membrány došlo k přetrhu, proto je její konkrétní tendence klesající). Vodní sloupce se tedy s rychlostí nárůstu tlaku od 150 cmH<sub>2</sub>O/min výrazně nezvyšují.

Výsledky testování jsou tedy příznivé k záměru urychlení měření. Toto slouží ke dvěma účelům. První je zrychlení testování hydrostaticky vysoce odolných textilií a druhý ke zrychlení testování pro případný přístroj určený ke komerčním účelům. Již v úvodu jsme zmínili spekulativní parametry textilií, které bývají uváděny výrobcem. Pro ošetření těchto nejasností by tedy bylo vhodné sestavit přenosný přístroj, pomocí kterého by si odběratel sám během několika minut mohl otestovat hydrostatickou odolnost požadované textilie.

## LITERATURA

- [1] HES, L., SLUKA, P.: *Úvod do komfortu textilií*. Vyd. 1. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. 109 s. ISBN 80-7083-926-0 (brož.).
- [2] Přehled materiálů. *ROCKPOINT // KATALOG // PODZIM/ZIMA // 2010/2011*. 2010. s. 127. Dostupný též z : <http://rockpoint.ecbook.cz/zima2010/#page=126-127>
- [3] *AlpinePro PTX* [online]. [cit. 26.3.2011].  
Dostupné z: <<http://new.alpinepro.cz/materialy-alpine-pro/>>
- [4] *AUTOMATIC HYDROSTATIC HEAD TESTER FX 3000 HYDROTESTER III* [online]. [cit. 27.3.2011].  
Dostupné z: <[http://www.textest.ch/pdf-files\\_en/3000-III\\_leaflet\\_en.pdf](http://www.textest.ch/pdf-files_en/3000-III_leaflet_en.pdf)>
- [5] *Historie SDL Atlas* [online]. [cit. 27.3.2011].  
Dostupné z: <<http://www.sdlatlas.com/About-Us/History->>
- [6] ČSN EN 20811.: *Stanovení odolnosti proti pronikání vody. Zkouška tlakem vody*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [7] SOBOTKA, Z.: *Reologie hmot a konstrukcí*. 1. vyd. Praha : Academia, 1981. 499 s.
- [8] WEIN, O.: *Úvod do reologie*. 1. vyd. Brno: Malé centrum, 1996. 84 s.
- [9] KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů. Část 1, Zpracování plastů*. 1. vyd. Liberec : Vysoká škola strojní a textilní, 1991. 250 s. ISBN 80-7083-074-3.
- [10] ŠIMEK, I.: *Fyzika polymérov*. Bratislava : SVŠT Bratislava, 1978
- [11] *Struktura a vlastnosti polymerních materiálů* [online]. [cit. 9.2.2011].  
Dostupné z: <<http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/Fyzika%20polymeru.htm>>
- [12] *Viskoelastické modely* [online]. [cit. 9.1.2011]  
Dostupné z: <[http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP\\_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_09.pdf)>
- [13] Hes, L.: Soukromé sdělení

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- Velikost vodních kapek za různých podmínek [1] .....	15
Obrázek 2 - Gore-Tex® Paclite®, líc .....	17
Obrázek 3 - Gore-Tex® Paclite®, rub.....	17
Obrázek 4 - AlpinePro PTX, líc.....	18
Obrázek 5 - AlpinePro PTX, rub .....	18
Obrázek 6 - AlpinePro Aquacore.....	19
Obrázek 7 - AlpinePro Aquacore.....	19
Obrázek 8 - Ukázka přístroje M018 Hydrostatic Head Tester .....	22
Obrázek 9 - Model dokonale elastické pružiny .....	26
Obrázek 10 - Model pístu s ideálními tokovými vlastnostmi.....	27
Obrázek 11 - Maxwellův model: sériové zapojení prvků, působení konstantní deformace [12].....	28
Obrázek 12 - Kelvinův model: paralelní zapojení prvků při konstantním napětí.....	29
Obrázek 13 - Zjednodušené schéma modelu představujícího textilní materiál: membránu spojenou s podkladovou textilií .....	31
Obrázek 14 - Rozpínání textilie při jednostranném působení hydrostatického tlaku .....	32

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Výparný odpor a relativní paropropustnost textilií .....	36
Tabulka 2 - Průměrné hodnoty daných parametrů .....	37
Tabulka 3 - Hodnoty vodního sloupce a času odpovídající rychlosti 60 cmH <sub>2</sub> O/min ..	38
Tabulka 4 - Hodnoty vodního sloupce a času odpovídající rychlosti 10 cmH <sub>2</sub> O/min ..	40
Tabulka 5 - Hodnoty vodního sloupce a času odpovídající rychlosti 10 cmH <sub>2</sub> O/min .	41
Tabulka 6 - Výška vrchlíku daného vodního sloupce v porovnání dvou rychlostí .....	44
Tabulka 7 - Výška vrchlíku daného vodního sloupce v porovnání dvou rychlostí .....	45
Tabulka 8 – Koeficienty pro přepočet vodního sloupce naměřeného vyšší rychlostí na hodnoty odpovídající měření normovanou rychlostí .....	48
Tabulka 9 – Průměrné hodnoty měření uvedené ve dvou jednotkách .....	49
Analýza standardní metody měření hydrostatické odolnosti textilií .....	55



## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Schéma znázorňující působení deformace a napětí v závislosti na čase (konstantní deformace) [12] .....	28
Graf 2 – Schéma působení napětí a deformace v závislosti na čase (konstantní napětí) [12] .....	29
Graf 3 – Hodnoty vodního sloupce dosažené při 60 cmH <sub>2</sub> O/min .....	39
Graf 4 – Hodnoty vodního sloupce dosažené při 10 cmH <sub>2</sub> O/min .....	40
Graf 5 – Hodnoty vodního sloupce dosažené při 150 cmH <sub>2</sub> O/min .....	41
Graf 6 – Závislost výšky vrchlíku namáhané textilie na výšce vodního sloupce při dvou rychlostech nárůstu tlaku (60 cmH <sub>2</sub> O/min, 150 cmH <sub>2</sub> O/min) .....	44
Graf 7 - Závislost výšky vrchlíku namáhaného materiálu na výšce vodního sloupce při dvou rychlostech nárůstu tlaku (10 cmH <sub>2</sub> O/min, 60 cmH <sub>2</sub> O/min) .....	46
Graf 8 – Vývoj kritické hydrostatické odolnosti v závislosti na rychlosti nárůstu tlaku .....	49

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Záznam nárůstu vrchlíku při rychlosti 60 cmH <sub>2</sub> O/min .....	57
Příloha 2 – Záznam nárůstu vrchlíku 150 cmH <sub>2</sub> O/min .....	59
Příloha 3 – Záznam nárůst vrchlíku při 10 cmH <sub>2</sub> O/min .....	61
Příloha 4 – Tabulka naměřených hodnot (včetně přepočtu na Pa) .....	63
Příloha 5 – Graf závislosti výšky vodního sloupce na čase, za který byl dosažen – souhrn veškerých materiálů a rychlostí .....	64

Příloha 1 – Záznam nárůstu vrchlíku při rychlosti 60 cmH<sub>2</sub>O/min



1,7 cm



2,0 cm



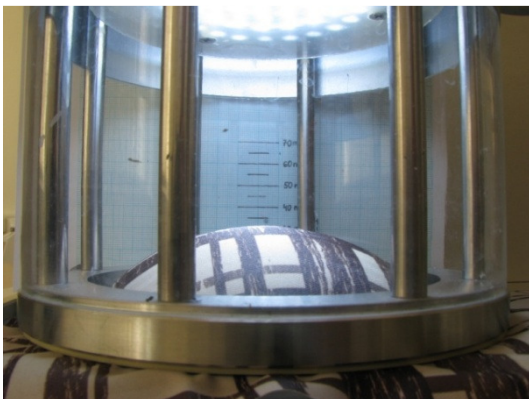
2,4 cm



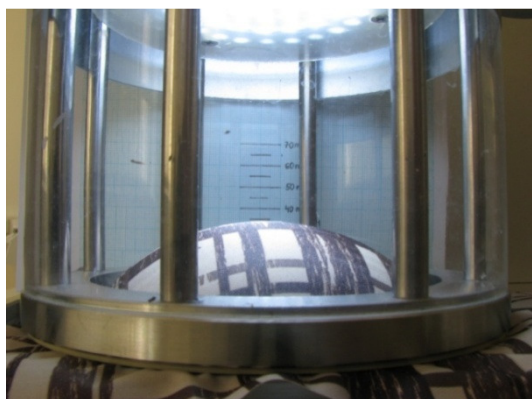
2,6 cm



2,9 cm



3,2 cm



3,4 cm

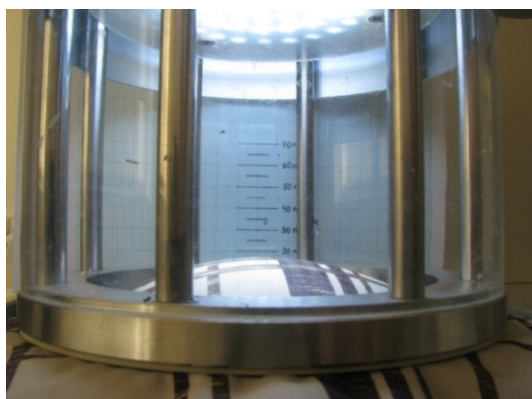


3,7 cm

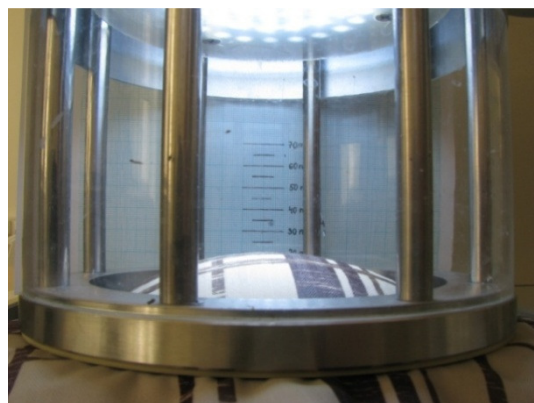


4,0 cm

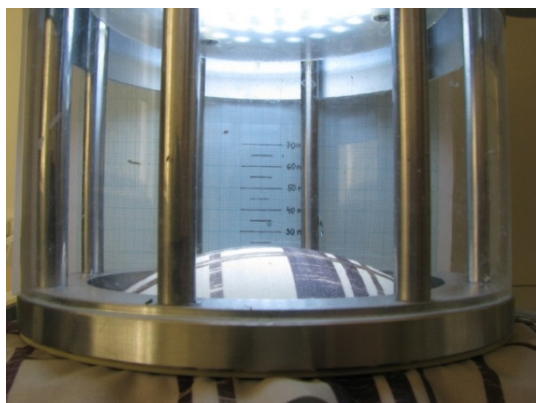
Příloha 2 – Záznam nárůstu vrchlíku 150 cmH<sub>2</sub>O/min



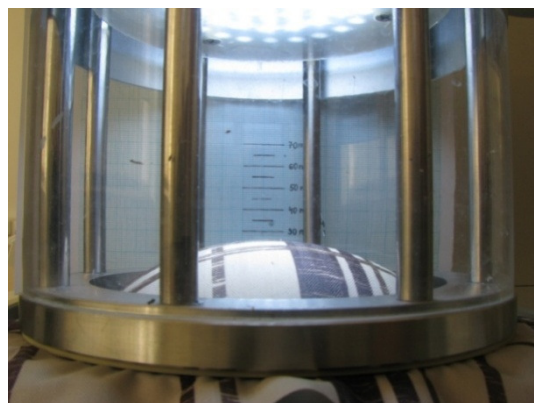
1,8 cm



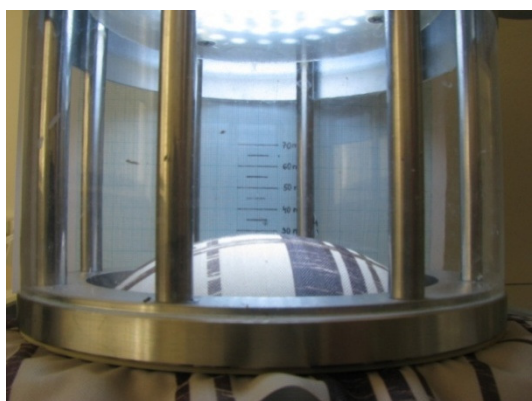
2,1 cm



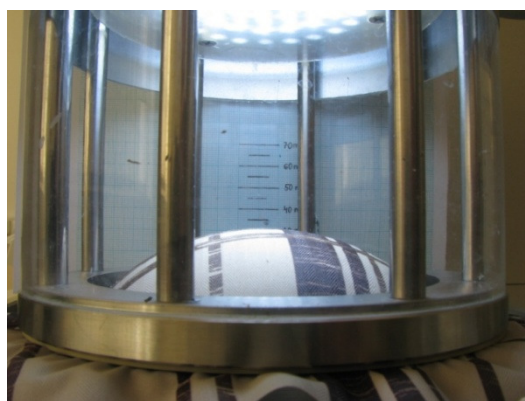
2,4 cm



2,6 cm

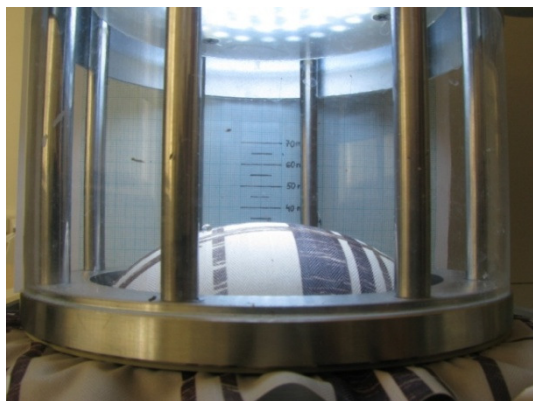


2,9 cm

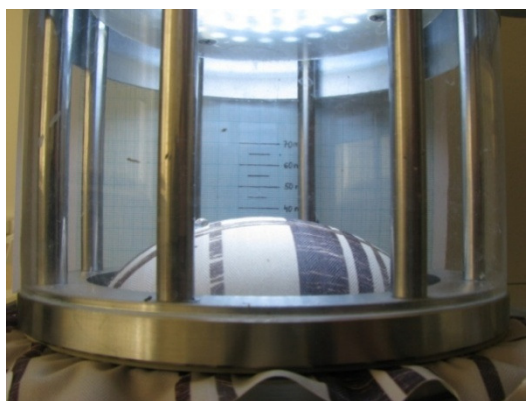


3,1 cm

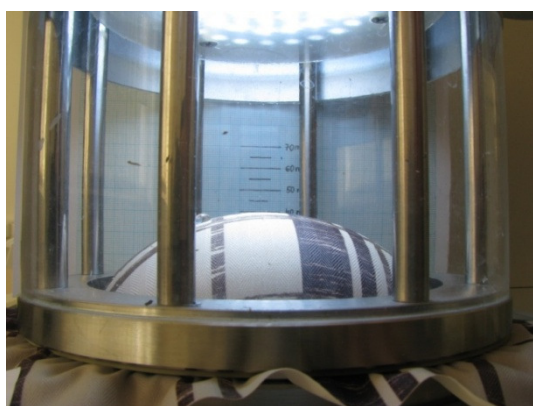




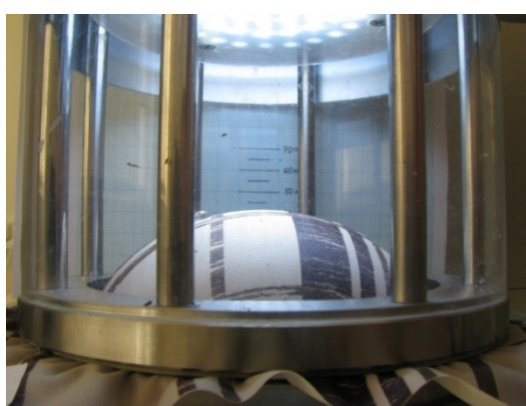
3,4 cm



3,6 cm



4,0 cm



4,2 cm

Příloha 3 – Záznam nárůst vrchlíku při 10 cmH<sub>2</sub>O/min



1,6 cm



1,7 cm



1,9 cm



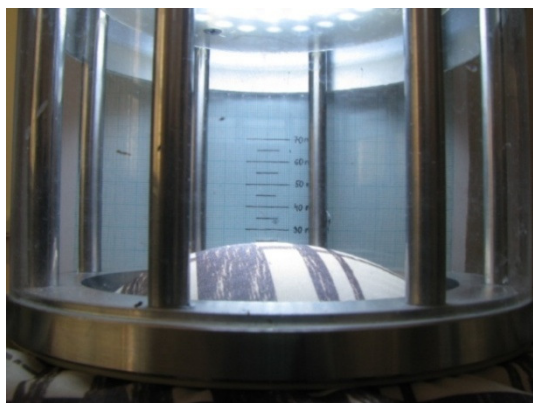
2,1 cm



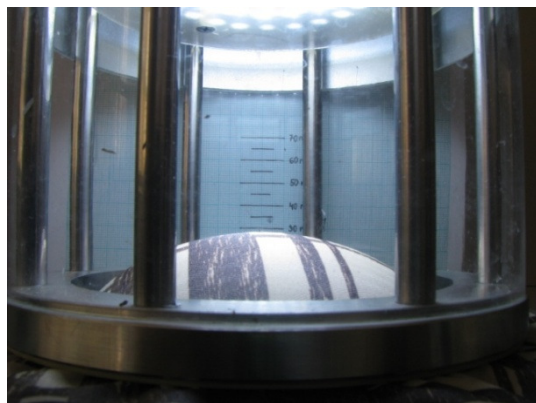
2,3 cm



2,5 cm



2,7 cm



2,9 cm

Příloha 4 – Tabulka naměřených hodnot (včetně přepočtu na Pa)

		10 cm H <sub>2</sub> O/min					60 cm H <sub>2</sub> O/min					150 cm H <sub>2</sub> O/min					500 cm H <sub>2</sub> O/min
		1.	2.	3.	prům.	sm.odch.	1.	2.	3.	prům.	sm.odch.	1.	2.	3.	prům.	sm.odch.	1.
1. porézní	cmH <sub>2</sub> O	1391,1	1237,2	1541,5	1389,8	152,2	2056,1	1966,4	1747,4	1923,3	158,8	2000,5	2080,1	2250	2110,2	127,4	1856,3
	Pa	136,4	121,3	151,1	136255	14,9	201,6	192,8	171,3	188559	15,6	196,1	203,9	220,6	206882	12,5	181990
	čas	2:19:17	2:03:45	2:34:04	2:19:02	–	0:35:00	0:32:48	0:29:09	0:32:19	–	0:13:43	0:14:45	0:15:23	0:14:37	–	0:06:13
2. neporézní	cmH <sub>2</sub> O	1294,5	1099	1255	1216,2	103,4	2241,8	2396,1	2080,3	2239,4	157,9	2925,2	2735,5	2502,4	2721	211,8	2885,7
	Pa	126,9	107,7	123	119235	10,1	219,8	234,9	204	219549	15,5	286,8	268,2	245,3	266765	20,8	282912
	čas	2:09:27	1:49:56	2:05:38	2:01:40	–	0:37:21	0:39:15	0:34:42	0:37:06	–	0:20:31	0:19:25	0:17:11	0:19:02	–	0:07:20
3. zátěr	cmH <sub>2</sub> O	398,2	423,7	431,9	417,9	17,5745	1024,1	924,4	963,8	970,8	50,2	1122,8	1400,2	1210,5	1244,5	141,8	1254,3
	Pa	39	41,5	42,3	40971	1,7	100,4	90,6	94,5	95176	4,9	110,1	137,3	118,7	122010	13,9	122971
	čas	0:39:58	0:42:56	0:43:07	0:42:00	–	0:17:04	0:15:44	0:16:04	0:16:17	–	0:07:30	0:09:20	0:08:04	0:08:18	–	0:03:01



Příloha 5 – Graf závislosti výšky vodního sloupce na čase, za který byl dosažen – souhrn veškerých materiálů a rychlostí

